

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS (GNSS, LIDAR E
VANT) PARA ESTUDO DE DRENAGEM E
SEDIMENTOS. ESTUDO DE CASO DA BACIA DE
DETENÇÃO DO GUARÁ – DF**

BRUNA OLIVEIRA DANTAS

ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE, PhD

CO-ORIENTADOR: HENRIQUE L. ROIG, PhD

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM
ENGENHARIA AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF: JANEIRO 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS (GNSS, LiDAR E
VANT) PARA ESTUDO DE DRENAGEM E
SEDIMENTOS. ESTUDO DE CASO DA BACIA DE
DETENÇÃO DO GUARÁ – DF.**

BRUNA OLIVEIRA DANTAS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

SÉRGIO KOIDE, PhD (UnB)

(ORIENTADOR)

LEONARDO ZANDONADI MOURA, MsC (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

DIOGO OLIVETTI, MsC (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 21 de JANEIRO de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

DANTAS, BRUNA OLIVEIRA

Aplicação de Geotecnologias (GNSS, LiDAR E VANT) para Estudo de Drenagem e Sedimentos. Estudo de Caso da Bacia de Detenção do Guará – DF. [Distrito Federal] 2019.

xiv, 113 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Bacia de detenção

2. Sedimentos

3. Geotecnologias

4. MDT

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DANTAS, B.O. (2019). Aplicação de Geotecnologias (GNSS, LiDAR E VANT) para Estudo de Drenagem e Sedimentos. Estudo de Caso da Bacia de Detenção do Guará – DF. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruna Oliveira Dantas

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Aplicação de Geotecnologias (GNSS, LiDAR E VANT) para Estudo de Drenagem e Sedimentos. Estudo de Caso da Bacia de Detenção do Guará – DF.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Bruna Oliveira Dantas

SQN 105 Bloco G Ap. 106 - 70734-070 - Brasília/DF – Brasil

RESUMO

Os processos de urbanização, em decorrência do crescimento populacional das cidades, enfrentam o desafio de conviver com as águas pluviais nesse ambiente. A implantação de áreas impermeáveis e consequente aumento do escoamento superficial reforçam a necessidade de estruturas que não só sejam capazes de lidar com a problemática localmente, mas que se preocupem em não transferir impactos para jusante. Dentre as iniciativas de drenagem sustentável enquadram-se as bacias de retenção, estruturas de macrodrenagem empregadas para redução dos impactos dos picos de vazão e que atuam possibilitando a melhoria qualitativa das águas provenientes das redes de drenagem. Essas águas apresentam sedimentos de diferentes granulometrias, que acumulam-se no fundo da bacia de retenção. O monitoramento da dinâmica desse material, nessas estruturas, permite uma maior compreensão de seu funcionamento e determinação de medidas cabíveis para melhoria dos processos. Este estudo aborda, de forma interdisciplinar, a aplicação de geotecnologias em uma bacia de retenção localizada no Parque Ezequias Heringer, na Região Administrativa (RA) X, Guará, Brasília - DF. Com o emprego de ferramentas geotecnológicas (GNSS, VANT e LiDAR) foram realizados levantamento topográfico e produção de Modelos Digitais de Terreno para representação quantitativa dos sedimentos acumulados na bacia. Foram obtidas coordenadas de perfis topográficos para as três técnicas e a tecnologia GNSS foi também implementada na obtenção de coordenadas dos pontos de controle e verificação utilizados no processamento dos dados obtidos por VANT. O GSD alcançado no voo foi de 2,6 cm. O processamento do voo teve como produto o MDT que foi comparado ao gerado com dados LiDAR e permitiu a determinação da relação cota-área-volume da área de estudo. Os resultados mostram que, considerando como padrão o MDT obtido por LiDAR, o uso de VANT é capaz de expressar a variação altimétrica do terreno. Entretanto, faz-se necessária a aplicação de técnicas de refinamento da nuvem de pontos para discriminação entre solo e áreas de vegetação densa. A variação na quantidade de pontos de controle, apresentada em três casos, ressalta a importância desses elementos na acurácia em estudos com enfoque na precisão altimétrica.

Palavras-chave: Bacia de retenção, MDT, sedimentos, geotecnologias.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
2.1	OBJETIVO GERAL.....	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	URBANIZAÇÃO E ÁGUAS PLUVIAIS	5
3.1.1	Escoamento Superficial	6
3.1.2	Drenagem Urbana.....	8
3.1.3	Bacias de retenção.....	10
3.2	LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS	14
3.2.1	MDS e MDT.....	14
3.2.2	GNSS.....	15
3.2.3	VANTs	17
3.2.4	LiDAR	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	25
4.1.1	Área de contribuição à drenagem	25
4.1.2	Bacia de Retenção	26
4.1.3	Solos	29
4.1.4	Clima	30
4.2	LEVANTAMENTO DE CAMPO.....	32
4.2.1	Levantamento com DGPS	33
4.2.2	Aquisição de dados batimétricos	37
4.2.3	Aquisição de dados VANT.....	40

4.3	PROCESSAMENTO DE DADOS	42
4.3.1	Correção de dados DGPS	43
4.3.2	Processamento VANT	48
4.3.3	Processamento LiDAR	54
4.3.4	Comparação entre Modelos Digitais de Terreno	54
4.3.5	Curva Cota x Área x Volume	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	Perfil topográfico obtido com GPS.....	58
5.2	Modelo Digital de Terreno - VANT	62
5.3	Comparação entre Modelos Digitais de Terreno	65
5.4	Cálculo Cota x Área x Volume de sedimentos acumulados - VANT e LiDAR... 77	
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	85
6.1	Conclusões	85
6.2	Recomendações	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
7	ANEXOS	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação de RPAs por peso máximo de decolagem. Fonte: ANAC (2017).	18
Tabela 4.1 - Equipamento e softwares utilizados no estudo.....	32
Tabela 4.2 - Batimetria da área alagada à entrada da bacia de detenção em estudo.	39
Tabela 4.3 - Características dos voos com Phantom 4.	42
Tabela 4.4 - Desvios-padrões obtidos pelo processamento das coordenadas referentes aos marcos fotoidentificáveis, com presença de base RBMC.	45
Tabela 4.5 - Pontos de controle e de verificação por cenário.....	51
Tabela 5.1 - Número de pontos e média dos erros dos perfis altimétricos.....	58
Tabela 5.2 - RMSE para diferentes casos de pontos de controle.	64
Tabela 5.3 - Padrão de Exatidão Cartográfico para produtos digitais, planimetria e altimetria, conforme PEC-PCD (DSG, 2016).	65
Tabela 5.4 - Validação altimétrica do levantamento LiDAR.	66
Tabela 5.5 - Variações entre valores altimétricos (LiDAR - VANT) para mesma cobertura de solo.....	67
Tabela 5.6 - Validação altimétrica do levantamento VANT.	68
Tabela 5.7 - Dimensões da bacia de detenção.	77
Tabela 5.8 - Cálculo do ERRO 1.....	79
Tabela 5.9 - Cálculo de volume por cota em porcentagem.	82
Tabela 5.10 – Estruturação de dados para cálculo de perda de volume da bacia de detenção.	84
Tabela 5.11 - Equações polinomiais de ordem 2 - Teórica, VANT e LiDAR (sedimentos, vegetação e ruídos)	84
Tabela 5.12 - Cálculo do ERRO 2.....	85

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 – Volume do reservatório de detenção.	12
Equação 5.1 - Equação para cálculo do ERRO1.	79
Equação 5.2 - Determinação do percentual do volume de sedimentos.	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Comparativo de hidrogramas pré e pós urbanização com variação no tempo e intensidade de chuvas. Fonte: REIS (2005 <i>apud</i> REIS <i>et al.</i> 2008).....	6
Figura 3.2 - Evolução de estruturas de retenção em área urbanas. Fonte: (CAMPANA <i>et al.</i> , 2007).....	10
Figura 3.3 - Diferença MDS e MDT. Fonte: (CARRILHO, 2016).....	14
Figura 3.4 - Fluxograma de metodologia de levantamento com VANT para geração de MDT. Fonte: Adaptado de Silva <i>et al.</i> (2014 <i>apud</i> Silva <i>et al.</i> 2016).....	19
Figura 3.5 - Identificação dos componentes em voos com VANT. Disponível em: http://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo . Acesso em: 12 de maio de 2018.....	20
Figura 3.6 - Cálculo de GSD para voos com VANT. Disponível em: http://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo/ . Acesso em: 12 de maio de 2018.....	21
Figura 4.1 - Fluxograma de materiais e métodos do projeto.	24
Figura 4.2 - Mapa de localização da Unidade Hidrográfica do Riacho Fundo no Distrito Federal.	26
Figura 4.3 - Mapa de localização da bacia de retenção na UH Riacho Fundo e de ambas em relação a zonas UTM.	27
Figura 4.4 - Evolução temporal da Lagoa de Estabilização para Bacia de Retenção SOF Sul. Fonte: Google Earth PRO	28
Figura 4.5 - Galeria de entrada da bacia de retenção (esquerda). Área alagada logo após a galeria de entrada da bacia de retenção (direita).....	28
Figura 4.6 - Resíduos próximos à entrada da bacia de retenção (esquerda). Sedimentos das margens próximas à entrada da bacia de retenção (direita).	29
Figura 4.7 - Bueiros do vertedor na descarga da bacia de retenção (esquerda). Vista da bacia de retenção a partir do vertedor (direita).	29
Figura 4.8 - Mapa de tipos de solo da Unidade Hidrográfica do Riacho Fundo.	30
Figura 4.9 - Marco quadriculado instalado.....	33
Figura 4.10 - Sinalização adicional com cal, imagem obtida por VANT.	34

Figura 4.11 - Mapa de distribuição espacial dos marcos fotoidentificáveis e o limite da bacia de detenção.....	35
Figura 4.12 - Equipamento Trimble R8s em procedimentos de montagem e coleta.	36
Figura 4.13 - Procedimento de coleta de perfis com GPS.....	37
Figura 4.14 - Levantamento batimétrico com Trimble R8s e QLiner.	38
Figura 4.15 - Distribuição dos pontos de coleta de coordenadas e batimetria.	38
Figura 4.16 - DJI Phantom 4 (a), controlador e <i>tablet</i> (b) utilizados no levantamento.....	41
Figura 4.17 - Planos de voo 1 (a) e 2 (b) no aplicativo <i>DJI Ground Station PRO</i>	41
Figura 4.18 - Fluxograma de processamento dados GPS.....	43
Figura 4.19 - Espaço de trabalho software TBC.	45
Figura 4.20 – Determinação da altitude ortométrica (H). Fonte: IBGE (2018).	46
Figura 4.21 - Fluxograma de Correção Ortométrica de pontos GPS.....	47
Figura 4.22 - Fluxograma de processamento no programa <i>Pix4D Mapper</i>	48
Figura 4.23 - Número de imagens sobrepostas segundo relatório de processamento.	49
Figura 4.24 - Conexões entre ortofotos de voo VANT.	50
Figura 4.25 - Distribuição de ponto de controle e de verificação na bacia de detenção.	51
Figura 4.26 – GCPs e CPs sobre nuvem densa de pontos.	52
Figura 4.27 - Correção da coloração do ortomosaico obtido com VANT.	53
Figura 4.28 - Variação de luminosidade em ortofotos.	53
Figura 4.29 - Determinação dos dados de entrada e saída do novo script (a) e script gerado para uso do programa (b).....	57
Figura 5.1– Distribuição dos perfis altimétricos obtidos com GPS.	59
Figura 5.2 - Perfil de elevação PQ.....	60
Figura 5.3 – Perfil de elevação PS.....	60
Figura 5.4– Perfil de elevação PP.....	61
Figura 5.5 - Perfil de elevação PL.	61
Figura 5.6 - MDT referente ao Caso 1, zero pontos de controle.	62

Figura 5.7- MDT referente ao Caso 2, quatro pontos de controle.....	63
Figura 5.8- MDT referente ao Caso 3, oito pontos de controle.....	63
Figura 5.9- Visualização 3D do Modelo Digital de Terreno obtido com VANT (Caso 3)..	69
Figura 5.10 - Visualização 3D do Modelo Digital de Terreno obtido com LiDAR.....	70
Figura 5.11 - Mapa da diferença altimétrica VANT - LIDAR.....	71
Figura 5.12 - Perfil de elevação PL.	73
Figura 5.13 – Perfil de elevação PS.....	74
Figura 5.14 – Perfil de elevação PP.....	75
Figura 5.15– Perfil de elevação PQ.	76
Figura 5.16 - Altura do vertedouro em relação à cota de fundo (mínima) da bacia de detenção (ArKis, 2005).....	77
Figura 5.17 - Curva Cota x Área acumulada VANT e LiDAR.	79
Figura 5.18 - Curva Cota x Volume acumulado VANT, LiDAR e Total.	81
Figura 5.19 - Identificação do ponto limite de volume ocupado na bacia de detenção, exemplo LiDAR.	83
Figura 7.1 - Curvas de Nível 50 cm -VANT.	96
Figura 7.2 - Curvas de Nível 30 cm - LiDAR	97
Figura 7.3 - Gráfico do percentual de volume de vazios por cota.....	98
Figura 7.4 - Gráfico de perda de volume (volume de sedimentos, vegetação e ruídos) por cota; Lidar (laranja) e VANT (azul).	99

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal;

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil;

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações;

BMPs - *Best Management Practices*;

BPMs - Boas Práticas de Manejo;

cm - Centímetros;

CPs - *Check Points*;

DF - Distrito Federal;

DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo;

DEM - *Digital Elevation Model*;

DSG - Diretoria de Serviço Geográfico;

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

EP - Erro Padrão;

ET-ADGV - Especificações Técnicas de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais;

ETE - Estação de Tratamento de Esgotos;

GCP - *Ground Control Points*;

GIS - *Geographic Information System*;

GMS - Grau, Minuto e Segundo;

GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*;

GSD - *Ground Sample Distance*;

ha - Hectares;

hab - Habitantes;

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

IG - Instituto de Geociências;

km² - Quilômetros quadrados;

m - Metros;

MDE - Modelo Digital de Elevação;

MDS - Modelo Digital da Superfície;

MDT - Modelo Digital de Terreno;

mm – Milímetros;

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index);

NMM - Nível Médio do Mar;

NOTAM - *Notice to Airmen*;

PEC - Padrão de Exatidão Cartográfica;

PEC-PCD - Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais;

RA - Região Administrativa;

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS;

RMSE - *Root Mean Square Error*;

RPA - Aeronave Remotamente Pilotada;

RPV - *Remotely Piloted Vehicle*;

RTK - *Real-Time Kinematic*;

SEGETH - Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação;

SGB - Sistema Geodésico Brasileiro;

SIGs - Sistemas de Informações Geográficas;

SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*;

TBC - *Trimble Business Center*;

TERRACAP - Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal;

TIN - *Triangulated Irregular Network*;

UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*;

UH - Unidade Hidrográfica;

UnB - Universidade de Brasília;

USGS - *United States Geological Survey*;

UTM - Universal Transversa de Mercator;

UVS - *Unmanned Vehicle Systems*;

VANTs - Veículos Aéreos Não Tripulados;

WD - White Balance;

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização provoca mudanças no uso e ocupação do solo. Áreas naturais e agrícolas antes com grau variado da taxa de infiltração, tornam-se impermeabilizadas. No Distrito Federal (DF), o crescimento populacional acelerado associado a processos de ocupação irregular que datam do início da construção de Brasília e cidades satélites intensificaram impactos sobre os cursos d'água em uma região já considerada com baixa disponibilidade hídrica (FERRIGO *et al.*, 2014). A dimensão da problemática pode ser percebida por meio de dados do IBGE (2018). Entre 1960 e 1990 o DF atingiu a marca de 1,6 milhões de habitantes. Já em 2010 este número chegou a 2.570.160 e densidade demográfica de 444 hab/km². Com o crescimento demográfico de 2,3% ao ano, o DF é enquadrado entre as maiores taxas do país. Para 2030 a projeção é de uma população de 3.773.409 habitantes.

Para garantir a disponibilidade hídrica em um cenário de intenso crescimento populacional é fundamental o manejo das águas pluviais, por mecanismos adequados para lidar com o aumento do escoamento superficial. Para tanto, devem ser adotadas medidas sustentáveis de drenagem urbana.

A drenagem sustentável é composta por medidas compensatórias estruturais e não estruturais, sendo complementar aos sistemas de drenagem tradicionais. O foco é no planejamento de toda bacia hidrográfica, de forma a evitar a transferência de inundações, impactos a corpos receptores e aporte de sedimentos para jusante. Com esse objetivo são implementadas estruturas de infiltração, detenção e retenção (GDF, 2009).

Dentre as estruturas de detenção, destacam-se as bacias de detenção. O funcionamento adequado dessas é importante para garantir que a quantidade da água que chega ao corpo receptor esteja adequada a sua resiliência e aos parâmetros determinados pela legislação. Vale ressaltar que o amortecimento e o tratamento das águas podem ser considerados complementares, uma vez que o tempo necessário para atingir níveis satisfatórios de remoção de poluentes é superior ao tempo demandado para controle dos picos de vazão.

A bacia de detenção estudada está localizada na Unidade Hidrográfica (UH) do Riacho Fundo, integrante da bacia hidrográfica do Lago Paranoá no DF. Sua escolha se justifica tanto pela escassez de estudos voltados ao acompanhamento dessas estruturas,

como pelas particularidades da área drenada para a bacia de detenção. No ano de 2012 havia no DF 38 bacias de detenção em funcionamento e 6 em construção (NOVACAP 2012). Apesar de ser uma quantidade expressiva, pouco se sabe sobre a eficiência dessas. Segundo relatado por Gomes (2015) em estudo qualitativo de 8 (oito) bacias dessas estruturas no DF, sete estavam em desacordo com Resolução CONAMA nº 357/2005. A bacia de detenção em estudo apresenta um volume excepcionalmente grande para a área. Dessa forma, é de se esperar que funcione também como bacia de retenção.

O Parque Ecológico Ezechias Heringer, no qual se insere a estrutura em estudo, localiza-se próximo ao Setor de Oficinas Sul (SOF-Sul), que em conjunto com outras regiões tem sua drenagem direcionada para a bacia, totalizando uma área drenada de 12,25 km². Resíduos gerados por oficinas mecânicas do Setor, como óleos lubrificantes, são conduzidos na forma de poluição difusa. Em visitas técnicas foi possível perceber um odor característico na galeria de entrada da bacia, que suscita suspeita da presença de ligações clandestinas de esgoto à rede de águas pluviais.

Para conhecer o comportamento da bacia e sua evolução temporal é necessário compreender, via diagnóstico e monitoramento, o seu funcionamento.

O estudo do comportamento das águas pluviais em áreas urbanizadas demanda dados atualizados e consistentes. São necessárias informações das características pluviométricas, como intensidade, duração e período de retorno; características da bacia hidrográfica, como área de drenagem, tipo de solo e uso e cobertura do solo, e questões relativas à urbanização, como sistema de drenagem, localização e extensão de áreas impermeabilizadas (CAMPANA; TUCCI, 2001).

Para obtenção e processamento dos dados a serem trabalhados nesses estudos são utilizados componentes de geoprocessamento. Esses possibilitam a manipulação de dados georreferenciados, mapas temáticos, imagens de satélites, fotografias aéreas, entre outros, permitindo a realização de diversos tipos de análises ambientais. Além de possibilitar um diagnóstico da situação atual, permitem o monitoramento e a realização de atualizações periódicas das informações (LACERDA et al., 2005).

Para estudar o desempenho de uma bacia de detenção na remoção de sedimentos a caracterização da topografia é fundamental. As geotecnologias se apresentam como ferramentas aos estudos. Metodologias de levantamento topográfico tradicionais podem ser dispendiosas com relação a tempo e recursos financeiros. A tecnologia GNSS (*Global*

Navigation Satellite Systems) tem sido empregada com esta função, já com maior facilidade na obtenção de dados. A implementação de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) e LiDAR (*Light Detection and Ranging*) possibilita coleta de dados de forma rápida e precisa sem necessidade de contato direto do operador com a superfície modelada. Essas três formas de obtenção de dados (GNSS, VANT e LiDAR) subsidiam a geração de Modelo Digital de Terreno (MDT), produto importante para conhecimento da dinâmica topográfica de um terreno (ALVES et al., 2016).

O presente trabalho objetiva, por meio da aplicação de geotecnologias, a compreensão integrada de sistemas de drenagem urbana. com enfoque ao atendimento à demanda por dados topográficos de alta qualidade para geração de Modelo Digital de Terreno (MDT) para o interior da bacia de detenção SOF Sul.

A estrutura do presente trabalho está disposta a seguir:

- Capítulo 1 – Introdução (presente capítulo).
- Capítulo 2 – Objetivos: geral e específicos.
- Capítulo 3 – Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica:. Embasamento teórico dos conteúdos necessários ao desenvolvimento do projeto e apresentação de trabalhos acadêmicos que possuem interface com o presente estudo.
- Capítulo 4 – Metodologia: Caracterização da área de estudo (área de contribuição à drenagem e bacia de detenção); Procedimentos e equipamentos adotados em cada etapa do levantamento de campo; Processamentos dos dados de campo e secundários.
- Capítulo 5 – Resultados e Discussão.
- Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o potencial e dificuldades do uso de diferentes técnicas para obtenção e processamento de dados topográficos para estudos hidrológicos e hidráulicos de águas pluviais em áreas urbanas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Levantar as características de topografia da bacia de retenção do Guará para fins de suporte à operação, monitoramento e dimensionamento de sistemas de manejo de águas pluviais.
- b) Comparar e aferir desempenho de técnicas de levantamento topobatimétrico (GNSS, VANT e LiDAR), com estudo do caso da bacia de retenção do Guará.
- c) Analisar a evolução da sedimentação na Bacia de Retenção a partir da perda de volume livre ao longo dos 11 anos de operação a partir de comparação entre as dimensões de projeto da estrutura e dados obtidos no presente estudo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão mostrados dados técnicos e referências relevantes ao embasamento dos procedimentos metodológicos adotados para o estudo. Serão abordados neste capítulo: contextualização dos impactos da mudança de uso e ocupação do solo pela urbanização no comportamento hídrico; discussão sobre sistemas de drenagem e tecnologias de baixo impacto no manejo de águas pluviais; análise de bacias de retenção como alternativa e sua relação com sedimentos carregados pelo escoamento superficial; utilização de GNSS, VANT e LiDAR para levantamento topográfico e determinação de Modelo Digital de Terreno (MDT); e compreensão do comportamento de sedimentos na bacia.

3.1 URBANIZAÇÃO E ÁGUAS PLUVIAIS

O desenvolvimento do meio urbano, com a alteração do uso e ocupação do solo, tem impacto sobre suas características físicas das bacias hidrográficas. Segundo Tucci e Collischonn (1998), a urbanização das cidades é acompanhada de três impactos principais sobre as águas, qualitativa e quantitativamente. Em relação à qualidade enquadra-se o aumento da chegada de sedimentos aos cursos d'água, devido à retirada de cobertura vegetal e presença de resíduos sólidos de disposição inadequada. O impacto de ligações clandestinas de esgoto às galerias de águas pluviais é também uma preocupação em relação à qualidade e é complexo de se mensurar. No quesito quantitativo, a impermeabilização da superfície do solo e a presença de condutos e canais ocasionam aumento nas vazões máximas e incidência de episódios de inundação. A Figura 3.1 ilustra os efeitos pós-urbanização, indicando menor escoamento de base (subterrâneo), maior velocidade na elevação do volume escoado e recessão mais brusca da porção precipitada em relação a um cenário de pré-urbanização.

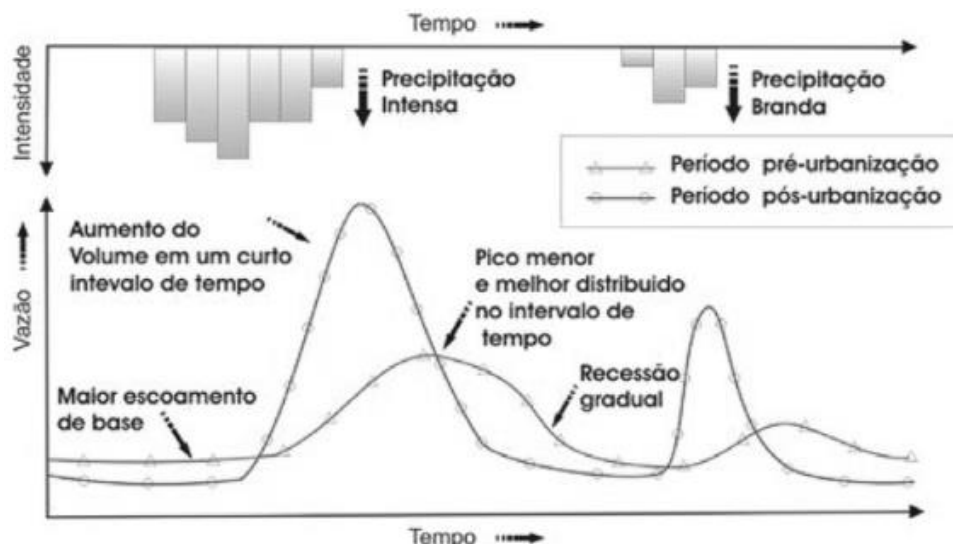


Figura 3.1 – Comparativo de hidrogramas pré e pós urbanização com variação no tempo e intensidade de chuvas. Fonte: REIS (2005 *apud* REIS *et al.* 2008).

A compreensão do comportamento das águas pluviais em diferentes cenários de impermeabilização do solo requer dados atualizados e de qualidade. A aplicação do sensoriamento remoto na obtenção de dados para estudos de uso e ocupação do solo visando monitoramento e planejamento tem sido bem difundida. Os sensores disponíveis atualmente possuem diferentes resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais, possibilitando maiores níveis de informação a serem extraídos dos dados (SANO *et al.*, 2009). A compreensão espacial da substituição de áreas permeáveis por impermeáveis, a flexibilidade com a qual é possível trabalhar com esses dados e a possibilidade de atualização constantes são ferramentas de grande potencialidade tanto na esfera técnica, para que se desenvolvam alternativas, quanto para gestão governamental.

3.1.1 Escoamento Superficial

O escoamento superficial remete à ocorrência e transporte da água, é o fluxo de água sobre o solo e através de canais superficiais. Boa parte dos estudos hidrológicos encontra-se ligada às águas superficiais, seu aproveitamento e à prevenção e proteção contra impactos relacionados ao seu deslocamento. Os fatores meteorológicos e características físicas de uma bacia hidrográfica determinam as particularidades do deflúvio em cada região.

Segundo a *United States Geological Survey* - USGS (2018), os fatores meteorológicos podem ser definidos a partir de: distribuição das chuvas sobre a área drenada; intensidade, volume e duração da precipitação; condições iniciais de umidade do solo devido à precipitação anterior e demais condições climáticas e meteorológicas que afetam a evapotranspiração (temperatura, vento, umidade relativa e estação do ano). Em relação às características físicas de bacias hidrográficas são considerados para efeito de estudo: a área de drenagem, forma da bacia, declividade, topografia, o padrão da rede de drenagem, lagos, lagoas e reservatórios, o uso e ocupação do solo, a tipo de cobertura vegetal e o tipo de solo.

Nos primeiros momentos da urbanização de uma região ocorre uma intensificação da exposição do solo, devido a obras de infraestrutura e loteamentos. Os loteamentos urbanos, por exemplo, são implementados por meio de intensa atividade de retirada da cobertura vegetal, deslocamento de grandes volumes de terra e desestruturação da camada superficial de solo. A movimentação de sedimentos provenientes dessas atividades impacta diretamente sobre os cursos d'água da região. Com a redução do ritmo de execução de obras, a produção de sedimentos tende a decair consideravelmente, sem, entretanto, cessar. Além do transporte de sedimentos pelo escoamento superficial, esses podem ser transferidos também por canais e condutos, se tornando uma das causas de enchentes, pela redução da capacidade de escoamento dos sistemas de drenagem. (TUCCI; COLLISCHONN, 1998).

O transporte de sedimentos é apenas umas das formas de impacto sobre os cursos d'água e pode ser enquadrado, de acordo com classificação das fontes de poluição em áreas urbanas, em pontuais e não pontuais (difusas). Poluição pontual é proveniente do lançamento direto de poluentes por fonte conhecida, como indústrias, estações de tratamento de esgoto ou esgoto bruto. Já as fontes não pontuais são subdivididas de acordo com a ocorrência de chuvas, uma vez que são elas são responsáveis pela chegada de grande parte dos contaminantes aos corpos d'água. Ao se tratar da vazão de tempo seco, a poluição advém de águas residuárias urbanas não coletadas. Com a vazão de tempo chuvoso são transportados pelas águas pluviais as cargas de deposição atmosférica, sedimentos e carga acumulados na superfície e carga acumulada em canais e galerias.

Em estudo em uma área de 16,6 km², correspondente à Bacia Experimental do Córrego Capão Comprido (BCCC), localizada no Distrito Federal, Ferrigo *et al.* (2014) analisaram o impacto da precipitação e alterações de uso e cobertura do solo na produção

anual de sedimentos. Para análise foram determinados quatro cenários para precipitação e dois para uso e ocupação do solo. Os quatro primeiros consistiram, respectivamente, em: redução da precipitação diária em 5% e 10%; aumento dessa em 5% e 10%. Os dois seguintes aumentaram o percentual de área urbanizada, de 7,56% para 15,51% no Cenário 1 e 30,34% no Cenário 2. Foi utilizado o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para trabalhar com esses cenários. Os resultados obtidos com a variação de cenários de precipitação foram mais significativos que os de uso e cobertura do solo com relação ao aporte de sedimentos, o que reforça sua relevância em processos de planejamento de uso do solo e recursos hídricos. É importante considerar também que técnicas agrícolas adequadas e conservação de áreas como as de reserva legal impactam em fatores climáticos.

3.1.2 Drenagem Urbana

Em GDF (2009) é descrita a abordagem tradicional e higienista adotada no Brasil no que tange à solução e prevenção de problemas na drenagem urbana. Essa linha clássica está baseada na rápida evacuação das águas urbanas, transferindo o problema das águas pluviais para jusante. Apenas a partir da década de 90 passou-se a introduzir no Brasil os sistemas com técnicas alternativas (compensatórias) denominadas Boas Práticas de Manejo (BPMs), ou *Best Management Practices (BMPs)*. Essas técnicas podem ser classificadas como não estruturais e estruturais. Medidas não estruturais abrangem, dentre outros, práticas educacionais e institucionais, readequação do uso e ocupação do solo e fiscalização de conexões ilícitas e vazamentos (URBONAS, 1994). Já as medidas estruturais são aplicadas para redução do risco de ocorrência de enchentes. Sua implementação acontece por meio de obras de engenharia e podem ser subdivididas em intensivas ou extensivas. As primeiras atuam diretamente nos rios. As extensivas abrangem a bacia hidrográfica e atuam modificando as relações chuva vazão em relação às condições de pré-instalação. Desta forma pretende-se a redução e retardamento dos picos de enchente e controle da erosão na bacia (TUCCI, 2003).

A classificação dos sistemas estruturais pode ser feita por categorias funcionais, conforme mostrado por Riguetto *et al.* (2009):

- Detenção do escoamento (Bacia de detenção ou de atenuação de cheia; Bacia de retenção com ou sem infiltração).

- Área inundável (Terreno adaptado a alagamento).
- Vegetação.
- Dispositivos de infiltração (Vala de infiltração; Bacia de infiltração; Pavimento poroso).
- Filtros orgânicos e de areia (Filtro superficial de areia; Filtro subterrâneo).
- Outras tecnologias alternativas.

As medidas estruturais podem estar enquadradas na macrodrenagem ou na microdrenagem. Ambas compõem a categoria de medidas de controle na fonte diferem-se quanto à escala e capacidade de amortecimento da vazão. A microdrenagem é composta por canais de pequenas dimensões ou condutos pluviais de até 0,80m de diâmetro (ADASA, 2018) e possui capacidade de drenagem para nível moderado. Os sistemas de macrodrenagem comportam volumes e vazões maiores, com redes de galerias de diâmetro igual ou superior a 1,00 m de diâmetro. Englobam a primeira categoria de medidas estruturais classificada por Riguette (2009), descritas anteriormente. Alternativamente, outros dispositivos de

No Distrito Federal, compete à Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa) outorgar lançamentos de águas pluviais, visando ao controle quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos (ADASA, 2011). Por meio da Resolução nº 9/ 2011, a Agência indica, no inciso terceiro do Art. 5º, que águas pluviais precipitadas sobre terrenos deverão, preferencialmente, passar por contenção e retardamento do lançamento ou invés de proceder-se com drenagem direta para ruas, sarjetas e/ou redes. Para alcançar esse objetivo são recomendados pela Resolução reservatórios de quantidade e qualidade com especificações de definição, dimensionamento e manutenção. Alternativamente, outros dispositivos podem ser utilizados, reduzindo as vazões de lançamento e volumes a serem amortecidos.

Para reservatórios de quantidade fica estabelecido que o lançamento no corpo hídrico não ultrapasse a vazão máxima específica de 24,4 L/(s.ha), excetuando casos específicos que deverão ser submetidos à análise. Para tanto devem ser considerados no processo de seleção da área para implantação fatores como: as características da bacia, capacidade de infiltração e dimensões do terreno.

3.1.3 Bacias de retenção

Bacias ou reservatórios de retenção são medidas estruturais integrantes de sistemas de macrodrenagem que objetivam minimizar o impacto hidrológico da redução da capacidade de armazenamento natural da bacia hidrográfica decorrente da urbanização. Esse mecanismo se dá pela condução do escoamento superficial pelas redes de drenagem a uma área de depressão no terreno, com estruturas de restrição ou redução da saída da água, sucedendo-se com o enchimento da bacia e atenuação dos picos de cheia (CIRIA, 2015).

A presença de vegetação é grande aliada à melhoria da qualidade da água detida, pela sua contribuição na remoção de materiais em suspensão e sedimentos, além de redução em níveis de toxicidade, metais pesados e nutrientes.

Bacias de retenção podem ser implementadas tanto em áreas residenciais quanto não residenciais e podem ser projetadas para múltiplos usos. Campana *et al.* (2007) classificam as possibilidades de uso em quatro fases complementares, visualmente representadas na Figura 3.2.

- Fase 1: Controle quantitativo do escoamento;
- Fase 2: Integração da fase anterior a múltiplos usos como lazer e recreação;
- Fase 3: Soma-se a melhora qualitativa do escoamento superficial;
- Fase 4: Adição da possibilidade de retroalimentação, aplicação como eventual fonte de abastecimento.

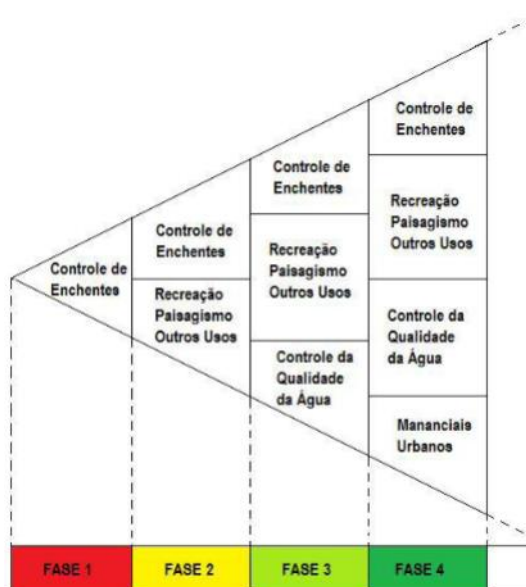


Figura 3.2 - Evolução de estruturas de retenção em área urbanas. Fonte: (CAMPANA *et al.*, 2007).

Entretanto, conforme Tucci (2003), em grande parte dos países em desenvolvimento, situação predominante na América do Sul, o foco ainda permanece na primeira fase, de controle de impactos quantitativos, uma vez que a incidência de enchentes ainda é a maior preocupação. Exemplifica afirmando que “os sistemas de detenção construídos nas cidades brasileiras possuem como foco apenas o controle do impacto das inundações, sem o componente de controle da qualidade da água.” (TUCCI, 2003).

Quanto ao dispositivo de saída das bacias de detenção estas podem ser classificadas em: *on-line* e *off-line*. Na configuração *on-line* há restrição na saída, resultando na subida do nível d'água com acumulação e atenuação do fluxo. Já em sistemas *off-line* não há restrição de saída e as águas vertem uma vez que é atingido o nível do dispositivo. Recomenda-se que estruturas *off-line* sejam evitadas em situações em que se intenciona a melhora da qualidade do fluxo, uma vez que os maiores riscos de poluição estão relacionados a fluxos menores (CIRIA, 2015). De acordo com Tucci (1997) nos sistemas *on-line* a drenagem utiliza-se da folga no volume de amortecimento e nos *off-line* há transferência do escoamento para área de amortecimento após alcançada certa vazão.

As estruturas apresentam-se também nos formatos aberto e enterrado, decisões de projeto relacionadas à disponibilidade de área. Sistemas enterrados viabilizam instalação em regiões onde essa disponibilidade é mais restrita e propiciam que sua superfície esteja integrada a outros usos. Contudo, os custos em relação à opção aberta são superiores (TUCCI, 2003).

Os reservatórios de detenção apresentam-se com superfície seca ou alagada, quando em períodos sem incidência de chuvas. Os alagados, ou com lâmina de água permanente, têm maior eficiência qualitativa, pelo controle de poluentes. Para o caso seco é recomendada concretagem do fundo, dado que há redução da seção de escoamento durante estiagens (TUCCI, 2003). É importante ressaltar que os objetivos de amortecimento e tratamento das águas podem ser complementares, uma vez que o tempo necessário para atingir níveis satisfatórios de remoção de poluentes é superior ao tempo exigido para controle do pico de vazões.

Conforme determinado pela Resolução nº 09/2011 da ADASA, dos reservatórios de quantidade deverá ser calculado de forma diferenciada a depender da área de contribuição

de drenagem para a estrutura. Para área até 200 hectares, o cálculo de volume resultará da Equação 3.1 a seguir:

$$V=(4,705 A_i) \times A_c$$

Equação 3.1 – Volume do reservatório de retenção.

Onde:

- V equivale ao volume em metros cúbicos (m³).
- A_i corresponde ao percentual de cobertura impermeável do terreno.
- A_c representa a área de contribuição à estrutura de retenção em hectares (ha).

Empreendimentos com área de contribuição superior a 200 ha exigirão estudos por meio de modelagem hidrológica para dimensionamento da estrutura de retenção e seus dispositivos de saída. Deve-se garantir que a vazão de saída para o corpo hídrico não se sobreponha à vazão de pré-desenvolvimento (ADASA, 2011).

Tendo em vista o bom funcionamento desses componentes da macrodrenagem, devem ser adotadas medidas de inspeção e manutenção que incluem possibilidade de acesso por equipamentos e veículos; remoção de detritos e lixo (CIRIA, 2015). Para o Distrito Federal, a ADASA estabelece por meio da Resolução nº 09/2011 que deverá ser apresentado pelo requerente um plano de manutenção para reservatórios de qualidade ou quantidade. O aumento de escoamento a jusante provocado por falta de manutenção dos sistemas acarretará penalidades previstas por lei ao outorgado.

No Distrito Federal existem bacias que estão em operação há alguns anos e têm acumulado sedimentos, o que reduz sua eficiência como bacia de retenção, ou seja, seu potencial de melhora qualitativa. Por outro lado, os sedimentos acumulados deixam de ser lançados no corpo de água propiciando oportunidade de remoção e amenização de danos ambientais. Segundo nota da Novacap (2012), no ano em questão havia no DF 38 bacias em funcionamento e 6 em fase de construção.

Gomes (2015) realizou estudo e monitoramento qualitativo de 8 (oito) bacias de retenção do Distrito Federal que ainda não se adequaram à Resolução nº 09/2011 da ADASA. Analisou-se 14 parâmetros e não foram identificadas diferenças significativas entre valores de montante (entrada da bacia) e de jusante (lançamento no corpo hídrico). Para sete das oito estruturas as concentrações estão em desacordo com determinação da

Resolução CONAMA nº 357/2005 por inadequação à classe dos corpos receptores. Os resultados encontrados apontam para a importância de manutenção periódica e adequação das estruturas a técnicas de drenagem mais atuais, para que se cumpra a função de controle quantitativo e qualitativo das águas pluviais destinadas a lançamento em corpos hídricos.

Em estudo desenvolvido também na cidade de Brasília-DF, Campana *et al.* (2007) realizaram análises qualitativas e quantitativas da eficiência de duas bacias de retenção no controle de inundações. Sendo, uma delas seca e a outra alagada, observou-se um melhor desempenho da segunda em relação à primeira no quesito remoção de nutrientes, fato explicado pelo papel similar ao de uma lagoa de estabilização, desempenhado pela estrutura alagada. Em termos quantitativos atingiu-se redução média das vazões de pico em 62,6% e 74%, para as bacias de retenção seca e alagada, respectivamente. Este resultado foi considerado satisfatório por contribuir com redução nas vazões de pico e na concentração de poluentes provenientes dos variados usos do solo da área drenada. Um ponto destacado e embasado pelos levantamentos qualitativos é o de ligações clandestinas de esgoto doméstico na rede de águas pluviais, o que impacta diretamente na qualidade das águas que chegam à bacia de retenção e no desempenho desta. Essa problemática atinge não apenas o DF, mas a maioria das cidades com sistema separador absoluto para esgoto.

3.2 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Esse tópico trata do embasamento dos métodos aplicados para obtenção dos dados: GNSS, VANT e LiDAR. Serão introduzidas informações históricas, técnicas, aplicabilidade à geração de MDT e bibliografias associadas.

3.2.1 MDS e MDT

A terminologia Modelo Digital de Elevação (MDE, ou DEM: *Digital Elevation Model*, em inglês), refere-se a uma maneira mais abrangente da representação da superfície e contém tanto informações do terreno exposto quanto as feições acima dele. Desta forma, proporciona uma ideia genérica sobre valores de elevação topográfica. Dois tipos de MDEs são comumente usados em sistema de informação geográfica (SIG): Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT).

De forma simplificada, o MDS representa a superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos existentes sobre ela e que influenciem no valor da reflectância do pixel. No caso de árvores e construções, por exemplo, a superfície representada refere-se ao topo das mesmas (Figura 3.3a). Já o MDT, por outro lado, representa a superfície real do terreno (Figura 3.3b). Essa representação do terreno é valiosa para geração de produtos como curvas de nível a ortoimagens (CARRILHO, 2016).

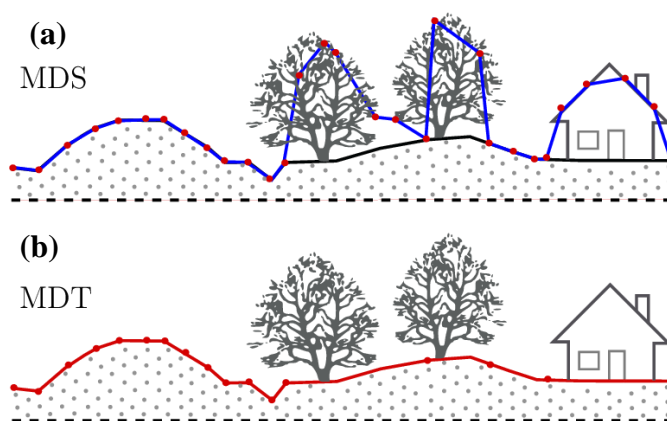


Figura 3.3 - Diferença MDS e MDT. Fonte: (CARRILHO, 2016)

Os dados que representam as superfícies na forma digital são classificados quanto à regularidade, estrutura e amostragem (original ou reamostrada). Algumas das estruturas principais são:

- TIN (*Triangular Irregular Network* ou Redes de triângulos irregulares);
- Curvas de Nível;
- Nuvem de pontos (pontos distribuídos irregularmente);
- Malha regular.

3.2.2 GNSS

O sistema GPS, operado pelo exército dos Estados Unidos foi o primeiro a operar com funcionalidade total do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Posteriormente a então União Soviética passou a operar seu próprio sistema GNSS, denominado GLONASS, composto por 24 satélites. Essa tecnologia vem sendo desenvolvida e aplicada por outros países, com destaque para os sistemas *Galileo* e *Beidou* (*Compass*), pertencentes a União Européia e China respectivamente. O aumento no número de constelações de satélites eleva o volume de dados disponibilizados, o que potencializa obtenção de melhores precisões, de 1 a 3 metros para posicionamento autônomo e na dimensão de milímetros para abordagens de posicionamento relativo, elevando também a confiabilidade e disponibilidade desses dados. Há alta aplicabilidade no suporte ao monitoramento ambiental, uma vez que a precisão demandada para esses estudos geralmente se encontra em uma grandeza centímetros. (SCHLODERER et al., 2011)

De acordo com Polezel (2010), cada satélite de cada uma das constelações realiza transmissão a partir de frequências. A constelação GLONASS, por exemplo, assim como a GPS, atua em duas frequências da banda L, L1 e L2. Essas são obtidas a partir cálculos que envolvem uma frequência fundamental. A banda L5 já vem sendo utilizada pelo sistema GPS. Outras constelações operam em bandas diversas e cada equipamento terá capacidade de captar algumas dessas frequências, informação que pode ser obtida no catálogo do fabricante.

O advento do RTK (*Real Time Kinematic*), um dos métodos de levantamento com GNSS, possibilitou redução nos tempos de ocupação, sendo necessários segundos ao invés de minutos em cada ponto levantado, o que permite obtenção de dados de forma instantânea e acurada ainda em campo. Nessa técnica são utilizados dois receptores, um estacionário e um móvel. O primeiro, estação base, permanece estático, possui coordenada conhecida e calcula constantemente os erros e executa transmissão de correções de coordenadas para o receptor móvel. O receptor móvel, ou *rover*, é transportado ponto a

ponto durante a coleta de dados. Essa tecnologia, ao contrário dos equipamentos tradicionais, não demanda visibilidade entre estações, o que reduz demandas de tempo e equipe técnica (JACOBS, 2005).

A precisão e confiabilidade dos valores gerados estão sujeitas a anomalias. Essas podem ser causadas por problemas como: multicaminho, obstruções, configuração geométrica dos satélites, condições atmosféricas (como o efeito da ionosfera) (TRIMBLE, 2016). O efeito de multicaminho consiste no recebimento pelo equipamento de sinais que não são provenientes de transmissão direta dos satélites, mas sim da reflexão sobre outras superfícies que podem ter inclinações variadas e portanto gerar dados errôneos. A fim de evitar esse efeito os receptores devem ser alocados com cautela. Muitos dos erros podem ser praticamente eliminados por meio de posicionamento relativo, combinação linear entre as portadoras L1 e L2 ou adoção de modelos matemáticos (POLEZEL, 2010).

Segundo Schloderer *et al.* (2011), em análise das variadas aplicações topográficas possíveis ao equipamento GNSS-RTK, para estudos de topografia detalhada são necessárias precisão horizontal de 0,3 metros e vertical de 0,6 metros. Com variações na precisão pode ser utilizado também em: planejamento de obras de engenharia, estudos geológicos, agricultura, reconhecimento topográfico, monitoramento ambiental, entre outros.

Gili *et al.* (2000) utilizou um GNSS-RTK para geração de mapas topográficos e constatou que, em relação a métodos clássicos de levantamento, a cobertura e produtividade são superiores para uma acurácia similar, como 12 a 16 mm na horizontal e 18 a 24 mm de elevação.

Em estudo de Silva, *et al.*, (2016) foi utilizado GNSS da marca GTR-G², com um par de receptores de dupla frequência L1/L2 e capaz de rastrear os satélites GPS e GLONASS. O equipamento foi utilizado no estudo com intenção de fazer um levantamento para o cálculo de volume de uma pilha de rejeito. Um marco de concreto foi implantado como estação de referência. localizado a 370 m da pilha de rejeito objeto do estudo. Para calcular o volume, foi gerado um MDT com base na nuvem de pontos obtida a partir do método de posicionamento relativo cinemático com taxa de ocupação de um ponto por segundo. Esse método consiste na determinação de um conjunto de coordenadas para cada época de observação, onde um receptor permanece estação de referência enquanto o outro se desloca sobre as feições de interesse. Além da determinação do

volume a partir de dados GNSS o trabalho comparou este produto com resultados provenientes de dados de VANT e LiDAR. Em relação ao VANT, o GNSS foi empregado no georreferenciamento dos pontos de apoio necessários à orientação das aerofotos obtidas. Georreferenciou também os alvos utilizados como referência para o LiDAR e os marcos determinados para comparação dos MDTs gerados pelas três técnicas.

3.2.3 VANTs

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), do inglês UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ganharam grande relevância nos últimos anos. A sigla engloba todos os veículos aéreos pilotados sem a presença de uma pessoa a bordo (EISENBEISS, 2004). O nome atribuído a este equipamento varia, a depender da área de estudo em que está inserido, a exemplo de *Unmanned Vehicle Systems* (UVS) ou *Remotely Piloted Vehicle* (RPV) e Aeronave Remotamente Pilotada (RPA).

O desenvolvimento dessa tecnologia foi motivado a princípio para usos militares, uma busca por formas de monitorar, reconhecer e adentrar por via aérea áreas de alto risco sem que ocorressem perdas de vidas do lado detentor da tecnologia, um reflexo da Segunda Guerra Mundial. Os primeiros experimentos com aplicação à fotogrametria não paramétrica foram realizados por Przybilla et al. (1979 apud Eisenbeiss, 2004), onde se tentou alcançar escalas de 1:1000 e superiores com velocidade do obturador da câmera em 1/1000 segundos. A alta velocidade estabelecida causou tremores, o que resultou em imagens desfocadas. Com os anos e estudos, a aplicação de VANTs se desenvolveu e tem sido empregada em atividades como: vigilância, segurança, sensoriamento remoto, monitoramento, observação e manutenção (EISENBEISS, 2004).

As categorias de enquadramento dessa tecnologia variam de acordo com a instituição que a determina. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) define em sua cartilha “Orientações para Usuários de Drones” três tipos de operação, definidas a partir da visibilidade do RPA, e três classes, que variam com o peso máximo de decolagem desse equipamento. Segundo ANAC (2017), quanto ao tipo a operação pode ser enquadrada como:

- BVLOS – mesmo com a ajuda de um observador o piloto não consegue manter o RPA dentro do campo visual.

- VLOS – é possível ao operador manter contato visual direto com o RPA sem necessidade de qualquer equipamento.
- EVLOS – operação em que o contato visual apenas é possível com auxílio de lentes, outros equipamentos ou presença de um observador de RPA.

Na Tabela 3.1 é possível observar a alocação dos RPAs em classes de acordo seu peso máximo de decolagem.

Tabela 3.1 - Classificação de RPAs por peso máximo de decolagem. Fonte: ANAC (2017).

Classe	Peso máximo de decolagem (kg)
Classe 1 – RPA	Maior que 150 kg
Classe 2 – RPA	Maior que 25 kg e até 150 kg
Classe 3 – RPA	Até 25 kg

A ANAC estabelece que para equipamentos acima da Classe 3 ou qualquer voo acima de 120 metros de altura, o piloto deve ter mais de 18 anos e passar por capacitação. Caso situado na Classe 3, deve ser feito, pelo usuário, um cadastro no site da Agência.

Dentre as vantagens desses equipamentos sobre demais meios de obtenção de imagem estão a possibilidade de revisita à área em curtos períodos de tempo, os baixos custos dos levantamentos e elevada resolução espacial. Figueira *et al.* (2013) mencionam a vantagem de se poder acoplar sensores modernos, de pequenas dimensões e resolução espacial da ordem de poucos centímetros. Para aerolevanteamento convencional, por exemplo, seriam necessários aeronave com de piloto, pista para decolagem e pouso e demais custos. O VANT se torna, portanto, uma saída economicamente mais viável para a aquisição de dados cadastrais de pequenas porções territoriais (MATIAS *et al.*, 2015). Além disso, é possível vencer a interferência de nuvens na obtenção das imagens, uma problemática comum em áreas de clima tropical e subtropical (FIGUEIRA; OLIVEIRA, 2013).

Em maio de 2017 a ANAC editou regulamento especial com regras gerais para o uso civil de aeronaves não tripuladas no Brasil. Essas regras são complementares às de outros órgãos que devem ter suas normas consideradas de acordo com as especificidades de cada caso. Dentre eles destacam-se: o Departamento de Controle do Espaço Aéreo

(DECEA), o Ministério da Defesa e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) ANAC (2017).

A aquisição e processamento dos dados obtidos pelo VANT pode ser dividida em três etapas: (1) planejamento de voo; (2) execução do voo; e (3) pós-voo (SILVA *et al.*, 2015). O fluxograma da Figura 3.4 explicita as etapas mencionadas para aplicação em levantamento de Modelo Digital de Terreno (MDT). Este estudo de Silva, *et al.* (2015) guiará a caracterização de procedimentos de obtenção de dados com VANT da presente fundamentação teórica.

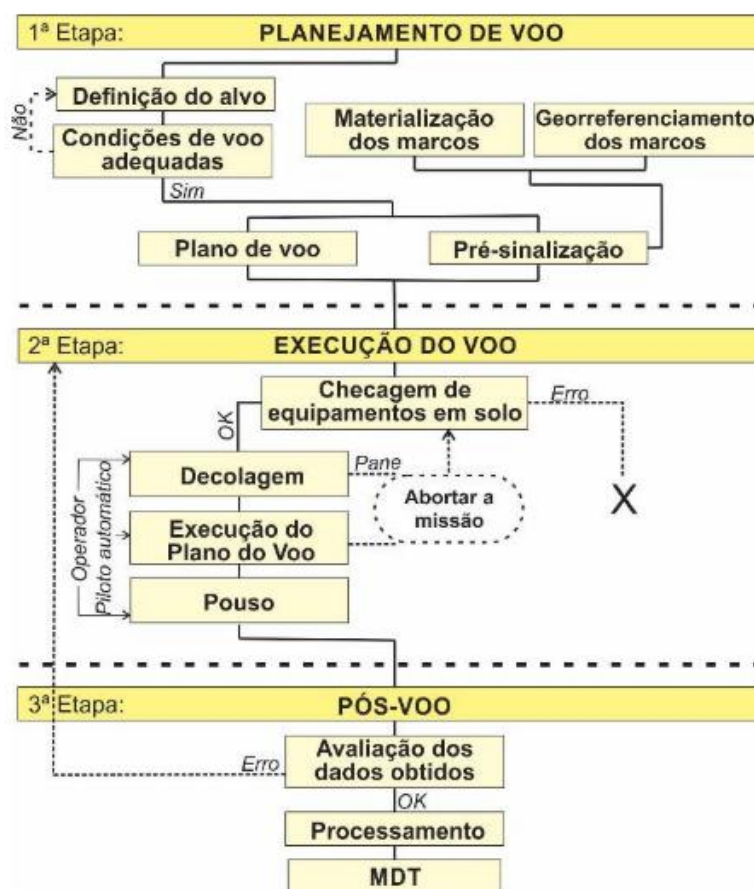


Figura 3.4 - Fluxograma de metodologia de levantamento com VANT para geração de MDT. Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2014 *apud* Silva *et al.* 2016).

A determinação do Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir de levantamento com VANTs é parte integrante do estudo “Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR”, realizado por Silva *et al.*, 2016. As etapas foram subdivididas conforme fluxograma apresentado acima e serão evidenciados a seguir alguns pontos considerados relevantes a cada etapa.

Para a 1ª etapa, planejamento de voo, foi necessária obtenção de uma autorização de voo a partir de um NOTAM (*Notice to Airmen*), em português, “Aviso aos Aeronavegantes”. O documento foi encaminhado ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão ligado a Aeronáutica. O objetivo é garantir a segurança pela não circulação de aeronaves tripuladas no momento dos levantamentos. Vale lembrar que para voos abaixo de 120 m de aeronaves já registradas no mercado não é necessária emissão de autorização, de acordo com as normas brasileiras vigentes. Em solo devem ser previamente estabelecidos os pontos de controle e verificação, com coloração marcante e de fácil identificação nas imagens que serão obtidas no voo. Esses pontos são georreferenciados com GNSS Geodésico para obtenção de suas coordenadas.

Ainda durante o planejamento é de suma importância a compreensão dos valores de entrada necessários para a alimentação e ajuste do programa de planejamento de voo. Dentre eles: tamanho do pixel, GSD, altura de voo, distância focal, tamanho da imagem e sobreposição lateral e frontal. A Figura 3.5 esquematiza alguns desses itens.

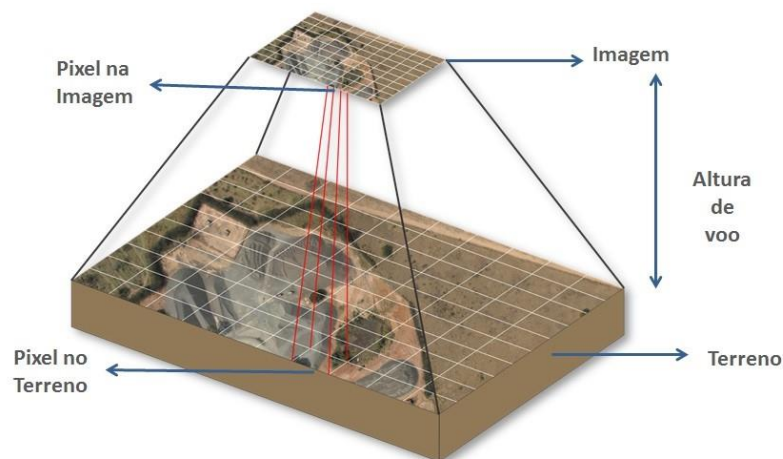


Figura 3.5 - Identificação dos componentes em voos com VANT. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

- O Pixel (b) define a resolução da imagem e é a menor unidade desta. Para calculá-lo utiliza-se uma razão entre o tamanho do sensor (mm) e os valores da quantidade de pixels (pixels) gerados por imagens deste sensor.
- O GSD (B) é a representação do pixel no terreno, a porção do terreno que um pixel irá capturar, geralmente apresentado em centímetros. A resolução da imagem será maior quanto menor for o GSD. A Figura 3.6 apresenta o esquema para cálculo desse elemento.

- A distância focal (f) está relacionada às lentes embarcadas no VANT. É importante que seja fixa ao longo de todo o voo para que não haja alterações nos valores do GSD.
- A altura de voo (hg) é determinada a partir da resolução que se deseja obter e deve ser calculada a partir do GSD conforme esquema abaixo.

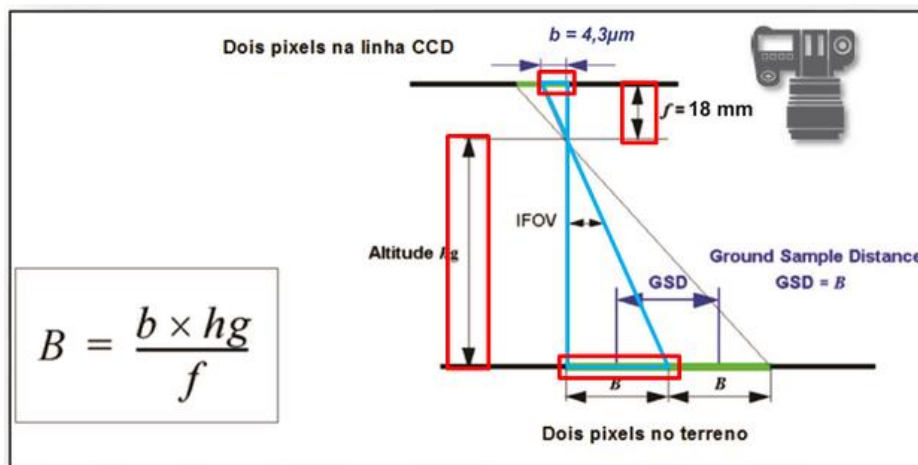


Figura 3.6 - Cálculo de GSD para voos com VANT. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo/>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

Em relação à Etapa 2, execução do voo, é importante ressaltar que apesar de prosseguir com plano de voo determinado previamente o VANT operará de forma automática, não autônoma. O operador deve acompanhar em solo: as imagens em tempo real e dados de telemetria (altitude, velocidade, localização, número de satélites captados pelo GPS e carga da bateria) e, caso necessário, alterar para comando manual.

Os equipamentos necessários nesta etapa são:

- VANT (multirotor ou asa fixa);
- Rádio controle;
- Câmera não métrica;
- Celular e/ou *tablet* e/ou *notebook*;
- *Softwares* de Voo (Manual e Autônomo);
- GPS de precisão.

Na 3ª Etapa são demandados programas de processamento e pós processamento de dados. Procede-se com avaliação dos dados coletados quando ao contraste, a nitidez, a

manutenção das sobreposições frontais e laterais que podem ter sido afetadas pelo vento. Em seguida virão: a fase de processamento para geração da nuvem de pontos, modelo TIN (*Triangulated Irregular Network*) para construção da malha poligonal 3D e exportação da ortofoto (VILLASENOR, 2012). Para produção do MDT primeiramente é gerado o MDS (Modelo Digital da Superfície), onde estão representados todos os objetos acima do solo como edifícios e árvores. A partir de um processo de filtragem estes objetos são removidos e é possível proceder com a reconstrução da superfície do terreno.

A implantação de VANTs para estudos topográficos demanda a utilização de pontos de controle e pontos de verificação na etapa de processamento. Esses são selecionados a partir dos marcos fotoidentificáveis georreferenciados com GNSS. Dessa forma é possível melhorar a adequação do modelo e verificar sua acurácia. Em seu artigo Silva et al 2015 realizaram uma análise comparativa para geração de MDT com variação no número de pontos de controle em uma mesma área. Um número maior de pontos de controle se mostrou responsável por aumentos expressivos de precisão altimétrica.

3.2.4 LiDAR

O LiDAR também é conhecido por LASER. O mecanismo se dá por um sistema de varredura a laser que mede as coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície. Para tanto, são armazenadas as distâncias entre o sensor e a superfície obtidas por meio de um pulso laser. A propagação do pulso ocorre na velocidade da luz, sendo a distância calculada a partir do tempo entre a emissão do pulso e captação da porção refletida pela superfície. A posição do ponto de encontro pulso-superfície é calculada a partir da posição do sensor e dos ângulos de emissão dos pulsos (WUTKE; CENTENO, 2007).

A instalação pode se dar em plataformas aéreas, conhecido como *Laser Scanner* Aerotransportado (LSA), ou terrestres, sob denominação *Laser Scanner* Terrestre (LST). A alta densidade de pontos amostrais coletados com alta precisão e em curto intervalo de tempo é característica de destaque deste equipamento (SANTOS *et al.*, 2014).

De acordo com Pacheco *et al.* (2011), desenvolvimento de metodologias para processamento de dados de LiDAR nos últimos anos tem permitido uma maior aplicação prática e operacional a estudos de engenharias, meio ambiente e geociências. Vem se consagrando também como alternativa viável à aquisição automática do MDT para mapeamentos de grande escala e alta acurácia.

O trabalho de Pacheco *et al.* (2011) investiga e discute diferentes métodos de classificação de dados gerados por LiDAR aplicados na geração automática de MDT em regiões urbanas e de vegetação. Utiliza-se conceitos de morfologia matemática em processo de filtragem e classificação de pontos. São aplicados os métodos de: Declividade, Superfície, Segmentação e Bloco Mínimo. Metodologicamente procedeu-se com: definição e caracterização da área e das condições de aquisição dos dados utilizados; descrição do método; estrutura para análise da metodologia proposta. Os desafios encontrados para a geração automática de MDT decorrem de áreas com menor incidência de pontos LASER sobre o terreno. Essas áreas foram identificadas em terrenos com acidentes topográficos (o equipamento não considera declividade) e de vegetação mais densa, pois algumas folhagens impediram que o feixe atingisse o solo (um problema em regiões tropicais e subtropicais). A uniformidade dos resultados foi averiguada pelo teste t-Student.

Em seu estudo “*The Effect of LIDAR Data Density on DEM Accuracy*”, Liu *et al.* (2007) exploram a relação entre a densidade de dados obtidos por LiDAR e a acurácia em MDTs gerados a partir destes. Analisam também a quantidade de dados que pode ser reduzida de forma vantajosa ao armazenamento e processamento, mantendo a possibilidade de geração de MDT com resolução apropriada. A coleta de dados foi realizada ao longo de aproximadamente um mês em área de 6900 km² localizada em Victoria, Austrália. Observou-se nos resultados que a redução na densidade de dados aumenta a incidência de erros no MDT. Esta mesma redução reduz pela metade o tempo de processamento. Concluiu-se que para terreno de complexidade moderada e dados de LiDAR com espaçamento médio 2,4 metros a densidade de pontos pode ser reduzida em até 50% sem prejuízos à qualidade do MDT e com vantagens ao processamento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este item trata da caracterização da bacia de detenção em estudo e dos produtos resultantes dos levantamentos de campo e processamento dos dados coletados. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma de trabalho com componentes, procedimentos e produtos que compõem o projeto.

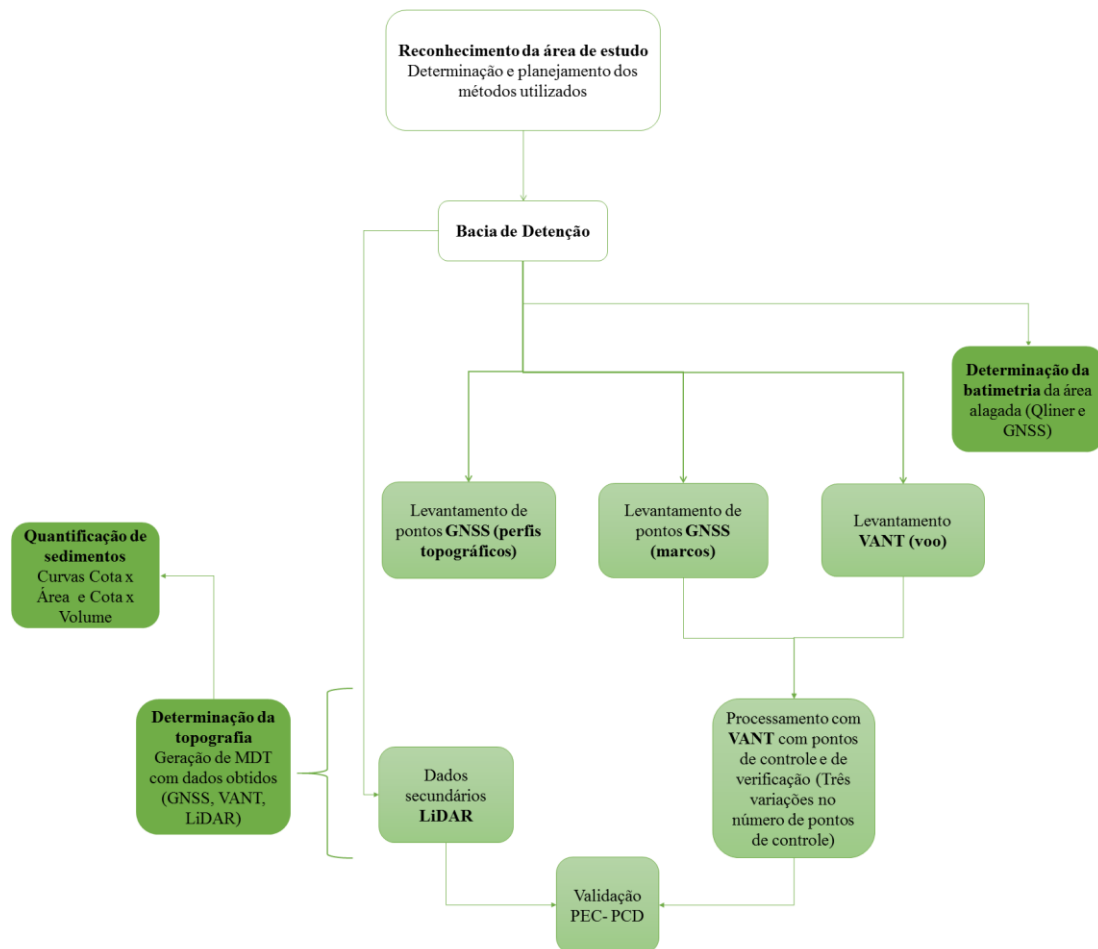


Figura 4.1 - Fluxograma de materiais e métodos do projeto.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é composta pela bacia de detenção localizada no Parque Ezechias Heringer, inserido no Setor de Oficinas Sul – SOF Sul, integrante da Região Administrativa (RA) X, Guará, Brasília - DF. Nesta seção serão apresentados dados locais, detalhamento técnico, histórico e registros fotográficos realizados na região da bacia de detenção.

4.1.1 Área de contribuição à drenagem

A área de estudo está localizada na Bacia Hidrográfica Lago Paranoá, Unidade Hidrográfica do Riacho Fundo. A Figura 4.2 apresenta a localização da unidade hidrográfica em que está inserida a área de estudo em relação ao território do Distrito Federal. A área drenada (de contribuição) é de 12,25 quilômetros quadrados (km²), considerada totalmente urbanizada e envolve as seguintes regiões: Cruzeiro Velho, Cruzeiro Novo, Área Octogonal, Instituto Nacional de Meteorologia, parte do Setor Sudoeste, Hospital das Forças Armadas, Setor de Indústria e Abastecimento, Subestação de Furnas e o antigo Serviço Nacional de Informações e parte do Setor de Oficinas Sul. A declividade do terreno varia de 1% a 3% (ArKIS, 2005). A elaboração do mapa da Figura 4.2 contou com dados das fontes *GeoNetwork* e *GeoPortal* (SEGETH), correspondentes respectivamente ao mosaico 2014 do DF; *shapefiles* dos limites do DF e Unidade Hidrográfica Riacho Fundo.

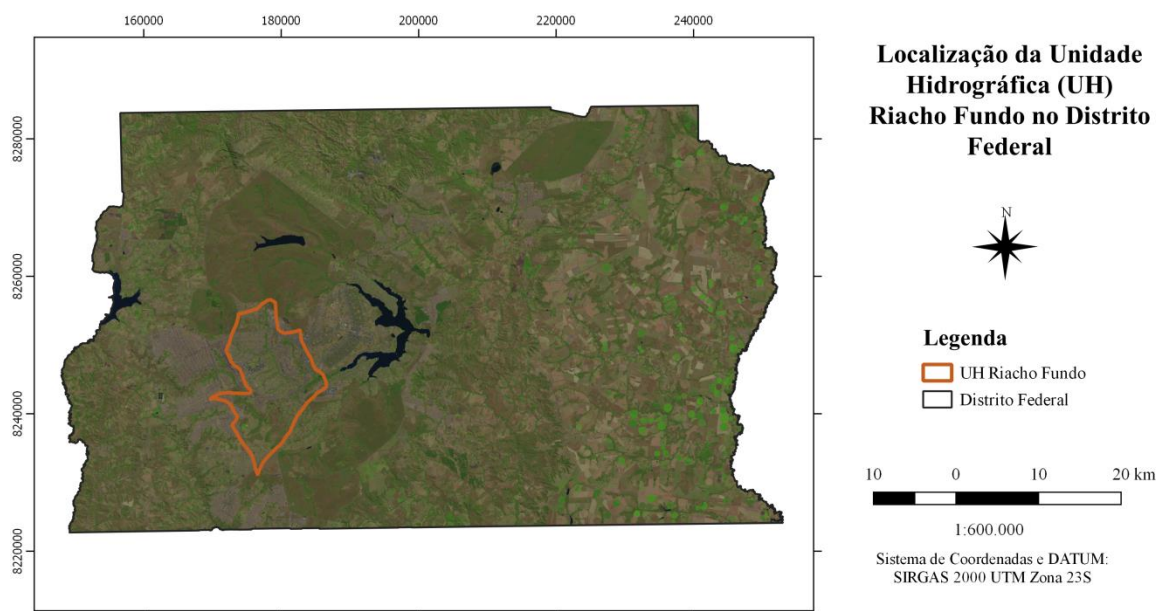


Figura 4.2 - Mapa de localização da Unidade Hidrográfica do Riacho Fundo no Distrito Federal.

4.1.2 Bacia de Detenção

A bacia de detenção estudada está localizada no Parque Ezechias Heringer, inserido no Setor de Oficinas Sul – SOF Sul, integrante da Região Administrativa (RA) X, Guará, Brasília - DF, com coordenadas aproximadas: 15°49'11.85"S e 47°57'42.20"O. A área interna da bacia é de aproximadamente 25 hectares (ha). Está inserida na UH Riacho Fundo, conforme representado na Figura 4.3. A bacia está localizada na Zona UTM 23S, enquanto a UH se encontra na intersecção das zonas 23S e 22S. A relação de fontes e dados utilizados para elaboração do mapa da Figura 4.3 pode ser observada a seguir:

- Unidade Hidrográfica Riacho Fundo - GeoPortal (SEGETH);
- Bacia de detenção SOF Sul – Delimitação manual a partir de imagens atuais do *Google Earth PRO*;
- Hidrografia - GeoPortal (SEGETH);
- Zonas UTM – sítio eletrônico *NGA Office of Geomatics*.

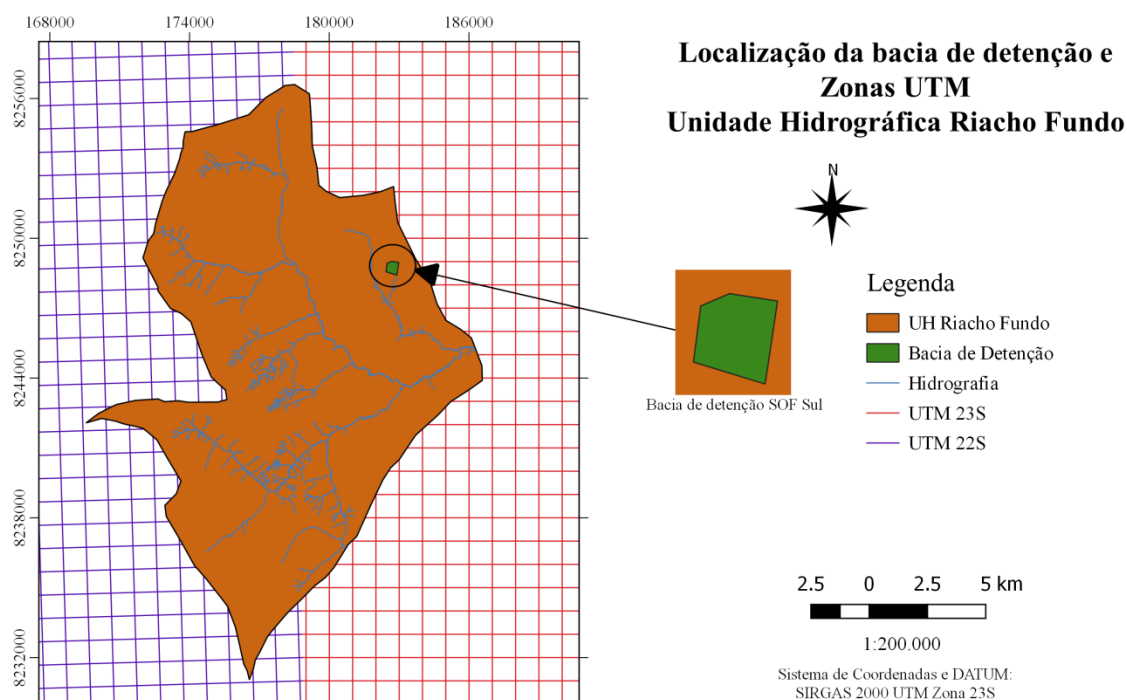


Figura 4.3 - Mapa de localização da bacia de detenção na UH Riacho Fundo e de ambas em relação a zonas UTM.

A bacia de detenção foi implementada em uma estrutura de antigas lagoas de estabilização integrantes do sistema de tratamento de esgoto da CAESB, funcional até 1993. Essa estrutura foi desativada com o início do funcionamento da Estação de Tratamento de Esgotos de Brasília Sul - ETE SUL. A utilização da área como bacia de detenção foi iniciada em 2007, uma vez que o fim das obras ocorreu em janeiro do mesmo ano. A transição entre estruturas está representada nos itens (a, b, c, d) da Figura 4.4. Os pontos de entrada (amarelo) e descarga (azul) da bacia de detenção estão demarcados com círculos na Figura 4.4d.



a) Junho 2002

b) Junho 2005



c) Maio 2008

d) Maio 2017

Figura 4.4 - Evolução temporal da Lagoa de Estabilização para Bacia de Detenção SOF Sul. Fonte: Google Earth PRO

A galeria de entrada, que conduz a água de drenagem para a bacia de detenção, apresenta seção retangular de 8,1 x 2,5 metros e no trecho final se divide em três septos retangulares paralelos com dimensões 3 x 2,7 x 2,5 m, condições adotadas tendo em vista facilidades construtivas (Figura 4.5). A descarga da bacia ocorre por meio de descarga de fundo através de bueiro de 1 m de diâmetro e por extravasamento superior via vertedor de 20m de comprimento (Figura 4.7). O lançamento, pós-amortecimento, no córrego Guará é conduzido por conduto de seção circular e diâmetro 1,5 metros (ArKIS, 2005).

Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 podem ser observados registros das visitas técnicas realizadas nos meses de maio a junho de 2018. Foi constatada presença de resíduos sólidos na região de entrada da bacia e arredores, assim como odor característico de águas residuárias e mosquitos, potenciais vetores.



Figura 4.5 - Galeria de entrada da bacia de detenção (esquerda). Área alagada logo após a galeria de entrada da bacia de detenção (direita).



Figura 4.6 - Resíduos próximos à entrada da bacia de detenção (esquerda). Sedimentos das margens próximas à entrada da bacia de detenção (direita).



Figura 4.7 - Bueiros do vertedor na descarga da bacia de detenção (esquerda). Vista da bacia de detenção a partir do vertedor (direita).

4.1.3 Solos

A unidade hidrográfica (UH) do Riacho Fundo, onde está localizada a bacia de detenção em estudo (fração em verde na Figura 4.3) é constituída por seis tipos de solo. A classificação e sua distribuição podem ser observadas na Figura 4.8. É possível identificar predominância de Latossolo Vermelho em toda a UH, incluída a região em que está inserida a bacia de detenção. Embrapa (1978, *apud* ADASA, 2015) apresentou mapeamentos dos solos do DF, apontando para um padrão de cobertura similar ao da área em estudo. Latossolos ocupam cerca de 50% do DF - Latossolos Vermelhos (~38%) e Latossolos Vermelho-Amarelos (15%) - e os Cambissolos recobrem aproximadamente 30%. Os Latossolos Vermelhos apresentam susceptibilidade à compactação, estão associados a áreas de cerrado e cerradão, são espessos e pouco férteis. A presente classificação leva em conta apenas composição de solos natural. É importante ressaltar que a UH do Riacho Fundo possui, em seu uso e cobertura, muitas áreas urbanizadas. Mesmo em locais em que não há impermeabilização completa o perfil hidrológico é modificado, devido ao revolvimento e degradação do solo, muitas vezes gerando remoção total dos

horizontes superficiais e exposição das camadas mais profundas, menos eficientes nos processos de infiltração de água (CADORIN; MELLO, 2011). Esse fator deve ser levado em conta para classificação de uso e cobertura do solo da área drenada e reforça a relevância do uso de dados de boa resolução espacial e da qualidade da classificação. Os dados apresentados na Figura 4.8 provêm de fonte similar aos da Figura 4.3, com adição da feição de solos, disponibilizada via banco de dados da ADASA.

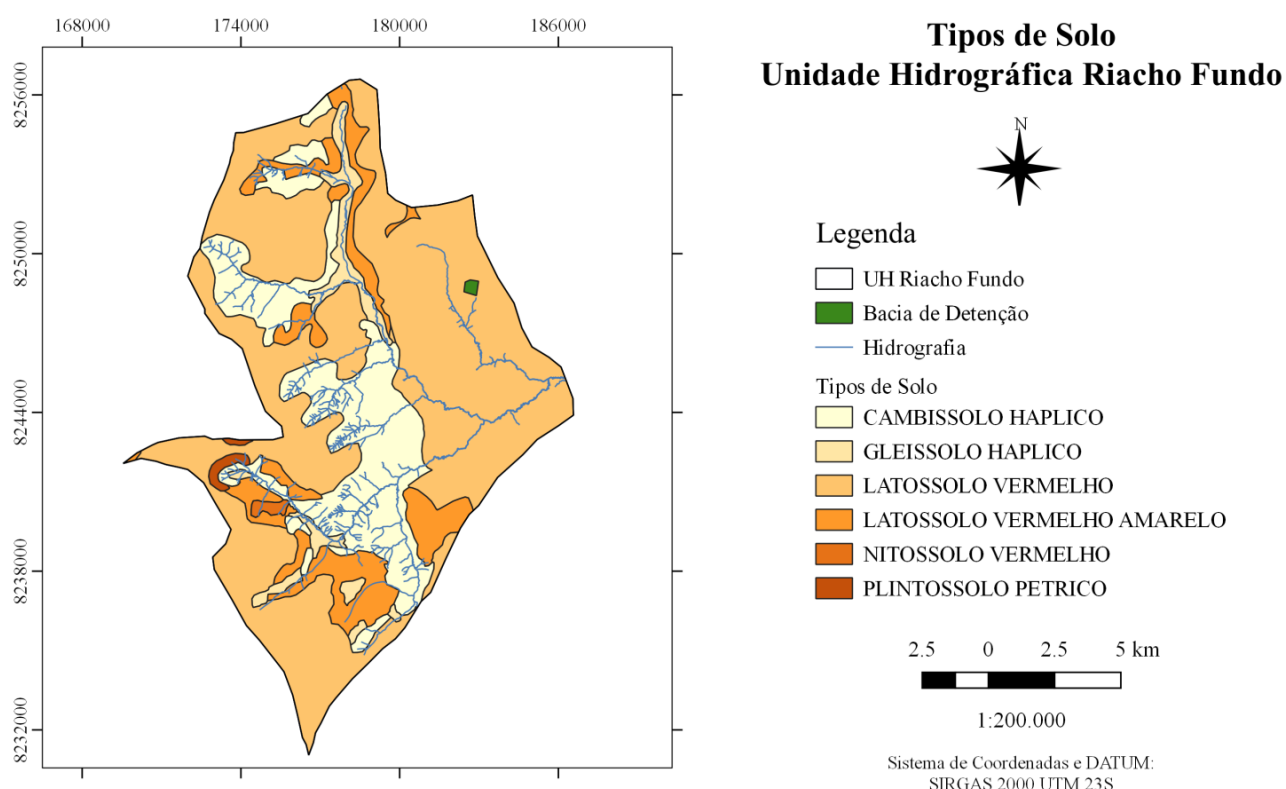


Figura 4.8 - Mapa de tipos de solo da Unidade Hidrográfica do Riacho Fundo.

4.1.4 Clima

O clima do Distrito Federal é composto por duas estações bem definidas, uma chuvosa e quente (entre outubro e abril) e outra fria e seca (entre maio e setembro). O período de chuvas mais intensas é de novembro a janeiro. A média pluviométrica anual encontra-se no intervalo de 1500 a 1700 mm. Quanto à média térmica anual há variações de 22 a 24°C, a média máxima ultrapassa 25°C e a mínima 18°C. De acordo com a metodologia de classificação de Köppen, no DF prevalece o clima tropical (Aw) e o tropical de altitude (Cwa) e (Cwb) ENGEVIX (1999 *apud* GOMES *et al.* 2004). A

umidade relativa do ar apresenta média climatológica anual de 67,6%. Nos meses mais secos, agosto e setembro, a umidade pode atingir valores bem baixos, com mínimos 11%, enquanto que nos meses mais úmidos, a umidade varia em torno de 75%.

4.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Este tópico aborda os procedimentos e equipamentos utilizados durante o estudo. Inclui as metodologias de obtenção de dados de campo com os equipamentos GPS, VANT e Qliner. É composto também pelos métodos de correção e processamento aplicados aos dados para geração dos MDTs. A Tabela 4.1 apresenta a relação equipamentos e *softwares* utilizados ao longo de todo o trabalho.

Tabela 4.1 - Equipamento e softwares utilizados no estudo.

Equipamentos	Aplicação
DJI Phantom 4, Controle e <i>tablet</i>	Obtenção de fotografias aéreas com VANT.
DGPS Trimble R8s	Obtenção das coordenadas dos marcos fotoidentificáveis e perfis altimétricos.
Qliner e Bote Inflável	Levantamento da batimetria em área alagada à entrada da bacia de detenção.
Softwares	Aplicação
<i>DJI Ground Station PRO</i>	Plano e execução de voo VANT.
<i>Pix4D Mapper</i>	Processamento de imagens VANT.
Trimble Business Center (TBC)	Processamento de pontos obtidos com DGPS Trimble R8s e adequação ao IBGE PPP e IBGE RBMC.
QGIS 3.0.3, ArcGIS 10.3 e Arcscene 10.3	Operações entre os produtos VANT, LiDAR e DGPS e elaboração de mapas.
MAPGEO2015	Correção ortométrica de pontos DGPS.
GeoPEC 3.5	Validação planimétrica e altimétrica de MDTs VANT e LIDAR ao Decreto nº 89.817 aliado à ET-CQDG.

4.2.1 Levantamento com DGPS

O equipamento Trimble R8s foi utilizado para três finalidades neste estudo. Uma vez instalados os marcos de referência fotoidentificáveis, o equipamento foi aplicado na coleta das coordenadas de cada um dos marcos. Foram definidos também quatro perfis com método *stop and go*, para referência e comparação com valores altimétricos dos produtos gerados posteriormente. E por fim, em conjunto com o aparelho QLiner, empregado no levantamento batimétrico da região de entrada da bacia de detenção.

4.2.1.1 Instalação dos marcos

Foram instalados 13 marcos com o objetivo de obter as coordenadas com o DGPS. Destaca-se a importância da identificação visual dos marcos nas fotogrametrias adquiridas por VANT e, em seguida, associação das coordenadas à ortofoto resultante do processamento do voo com VANT. O resultado final da instalação pode ser observado na Figura 4.9. As características principais dos marcos são:

- Placas de metal de 20x20 cm, com marco quadriculado de mesmas dimensões. Cobertura com plástico auto-adesivo. Placas parafusadas a piquetes de madeira de, em média, 15 cm de altura.
- Devido à existência de regiões com solo muito úmido foi adotado um procedimento específico na instalação, tendo em vista a estabilidade e durabilidade da estrutura. Após retirada da vegetação na área, a base de cada piquete foi enterrada e cimentada a uma altura de 5 cm do solo.



Figura 4.9 - Marco quadriculado instalado

Por segurança optou-se por testar uma sinalização adicional com cal - hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 - visando melhorar a identificação visual e substituição caso tivéssemos problema com as marcações propostas. O uso desse material é uma opção de menor custo e de implementação mais fácil rápida, apresentando, porém, menor durabilidade a intempéries. O resultado do uso da cal pode ser verificado na Figura 4.10 abaixo. No entanto, a resolução espacial resultante do voo foi suficiente para identificação das placas usadas nos marcos, deste modo a sinalização com cal foi abandonada.

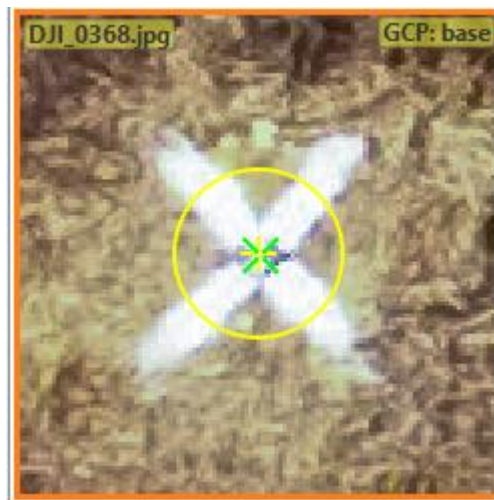


Figura 4.10 - Sinalização adicional com cal, imagem obtida por VANT.

O planejamento da alocação desses equipamentos considerou a otimização da distribuição espacial para melhor representatividade das feições. A instalação em campo, entretanto, se mostrou desafiadora em alguns trechos, devido a áreas de vegetação mais densa e zonas de solo mais úmido. A distribuição final dos marcos pode ser observada no mapa da Figura 4.11.

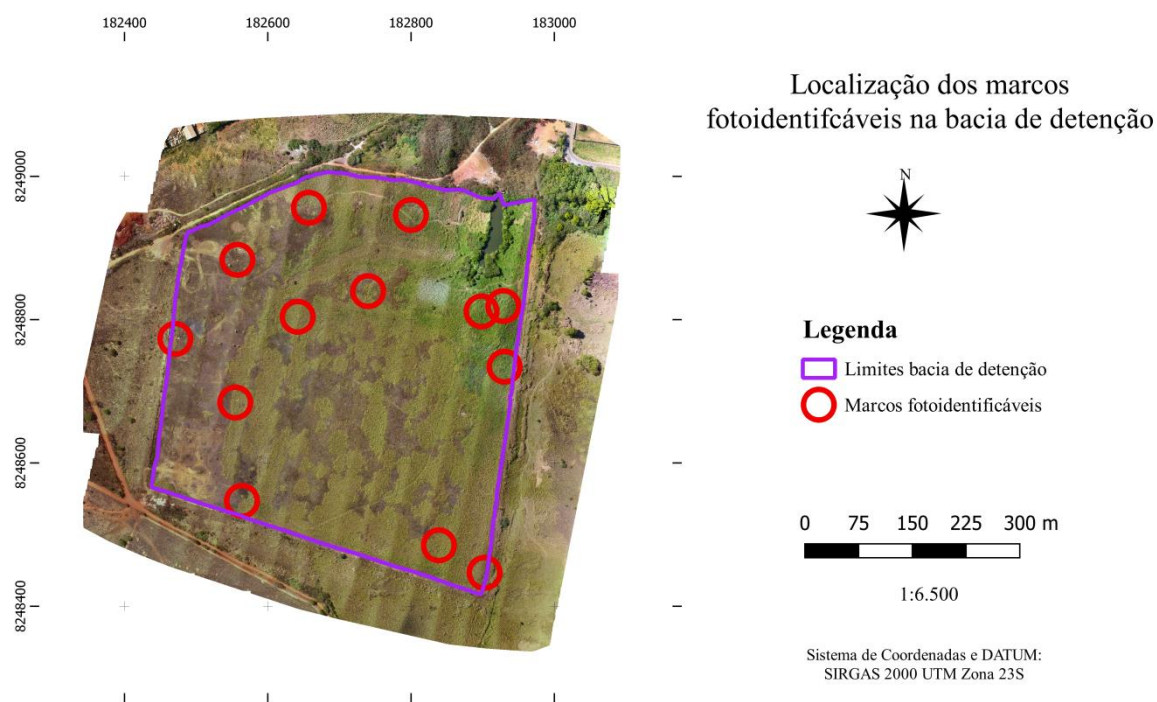


Figura 4.11 - Mapa de distribuição espacial dos marcos fotoidentificáveis e o limite da bacia de detenção.

4.2.1.2 Coleta de coordenadas dos marcos com GPS

Para essa etapa foi empregado o Sistema:

- R8s GNSS da Trimble com capacidade de captar simultaneamente sinais dos seguintes satélites: GPS (L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5); GLONASS (L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3); SBAS0 (L1C/A, L5); Galileo (E1, E5A, E5B) e BeiDou (COMPASS - B1, B2).

O método de levantamento *RTK* foi aplicado para obtenção das coordenadas de cada marco. O *rover*, parte integrante do GPS Trimble R8s, localizado na parte superior de uma haste de 2 metros, foi posicionado sobre o centro de cada marco (Figura 4.12a). Ao gerar o novo projeto no equipamento é importante considerar que os marcos estão a 5 cm do solo e que a altura do rover será, portanto, de 2,05 metros. O tempo de coleta em cada ponto foi de 15 min, durante os quais a haste estática foi mantida com auxílio de bipé (Figura 4.12b).

A coleta dos marcos ocorreu em dois dias de trabalho de campo, sendo:

- 18/08/2018 – Instalação dos marcos e coleta das coordenadas de 4 marcos além da estação base.
- 25/08/2018 – Coleta das coordenadas de 8 marcos além de uma nova estação base.

Foram obtidos também pontos “topo”, com tempo de coleta de 2 min, ao longo do percurso entre os marcos, para obtenção de maior cobertura da área da bacia de detenção. Na Figura 4.12 estão apresentadas a base em momento de montagem (a) e o *rover* durante coleta (b).

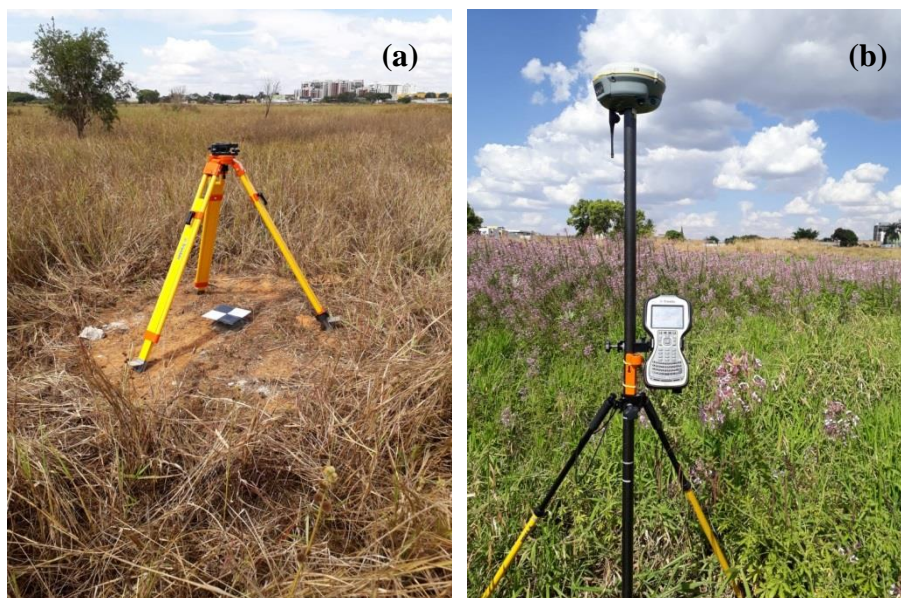


Figura 4.12 - Equipamento Trimble R8s em procedimentos de montagem e coleta.

4.2.1.3 Coleta de coordenadas dos transectos com DGPS

Além dos pontos de controle para confecção das ortofotos, foram levantadas 4 seções transversais (perfis) utilizando o modo *RTK* para coleta de pontos ao longo da seção. O levantamento envolveu uma trena de 30 metros fixada com auxílio de martelo a uma seção de 15 cm de vergalhão para cada ponto. Adotou-se espaçamento entre pontos de 30 metros, tempo de coleta de 3 minutos por ponto, no método *stop and go*, ou posicionamento relativo semicinemático. O posicionamento por esse método é enquadrado na transição entre o estático-rápido e o cinemático. A coleta das coordenadas por ponto ocorre em períodos curtos de tempo e a comunicação entre a base e o *rover* não deve ser interrompida durante o levantamento (INCRA, 2013). A vegetação arbórea é muito escassa no interior da estrutura de detenção (Figura 4.13), favorecendo a manutenção do sinal.

Foram levantados quatro perfis de elevação, dois em cada sentido da área estudada (vertical e horizontal). A distribuição dos pontos dos perfis pode ser observada na seção 5.1 deste documento. A Figura 4.13 ilustra o procedimento descrito.

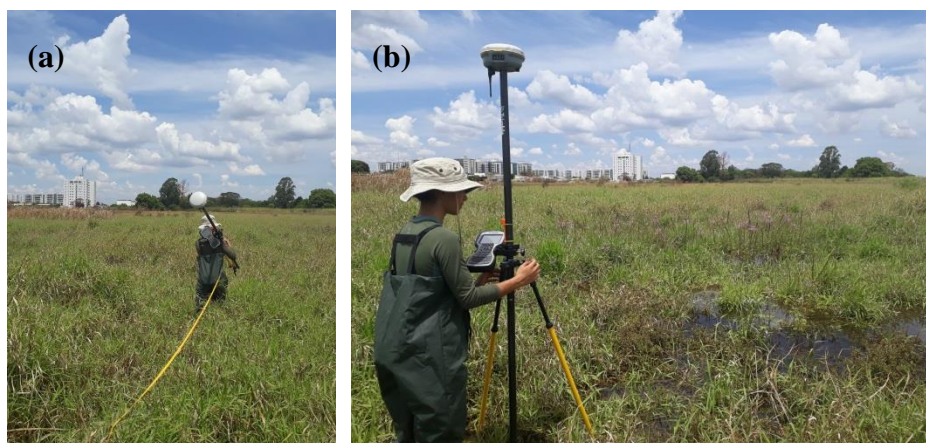


Figura 4.13 - Procedimento de coleta de perfis com GPS.

4.2.2 Aquisição de dados batimétricos

O perfil batimétrico da região de entrada da bacia de detenção foi obtido com utilização do GPS Trimble R8s, QLiner e bote inflável (Figura 4.14). Apesar de ser um equipamento capaz de mensurar a vazão do curso d'água, apenas a medida altimétrica foi considerada para esse estudo. O planejamento e execução levaram em consideração a demarcação de quatro segmentos, no sentido horizontal da área alagada, com medição de 3 pontos por seguimento, conforme apresentado na Figura 4.15.





Figura 4.14 - Levantamento batimétrico com Trimble R8s e QLiner.

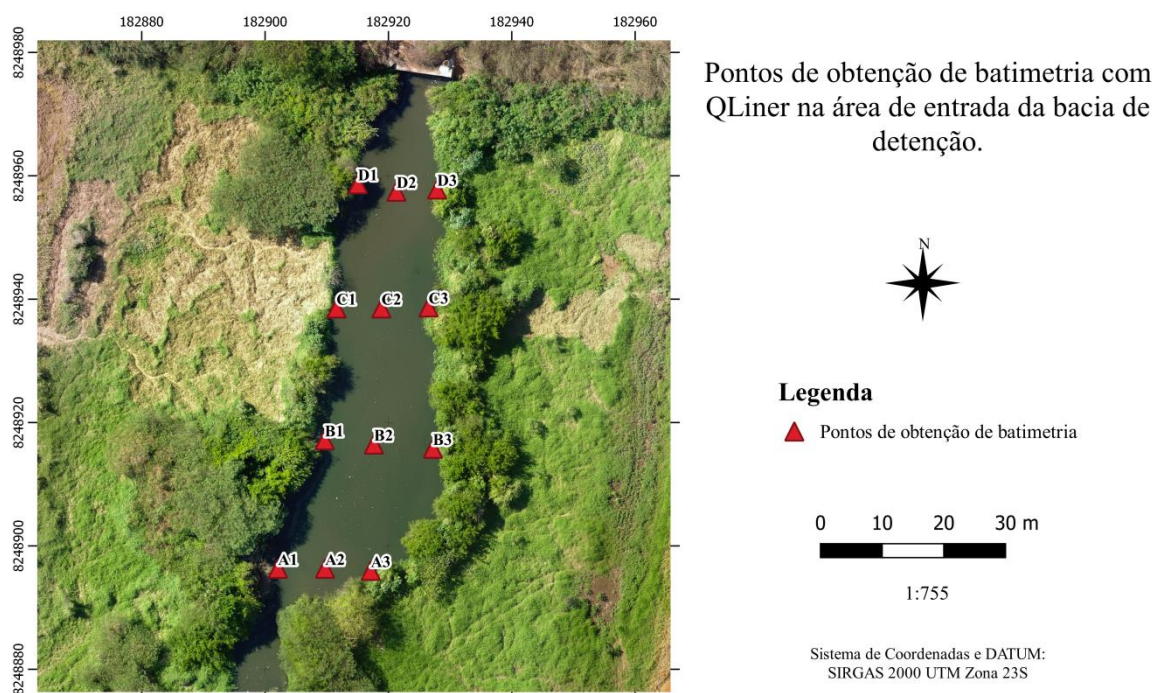


Figura 4.15 - Distribuição dos pontos de coleta de coordenadas e batimetria.

Foram utilizados 160 metros de corda nylon trançada 4 mm, com marcações a cada 20 metros, para uniformização da distância entre os pontos. A corda foi amarrada ao bote e liberada do ponto próximo à base do GPS, sobre a galeria de entrada da bacia. Inicialmente, foram liberados 80m, suficientes para alcançar o final do trecho longitudinal

navegável. Procedeu-se com recolhimento, a cada 20 metros, e obtenção de 3 pontos a cada trecho recolhido.

Como não haviam medições prévias, utilizou-se, também, uma haste de metal milimetrada para certificação do funcionamento adequado do Qliner em situação de fundo instável. O tempo de coleta por ponto, com o equipamento, foi de 3 minutos. A Tabela 4.2 abaixo apresenta a identificação dos pontos, os valores computados pelo Qliner e a leitura visual do nível na haste milimetrada, respectivamente.

Tabela 4.2 - Batimetria da área alagada à entrada da bacia de detenção em estudo.

Ponto	QLiner (m)	Haste milimetrada (m)
A1	0,28	0,25
A2	0,88	1,0
A3	0,38	0,4
B1	1,09	1,0
B2	0,79	0,84
B3	0,87	0,93
C1	1,16	1,12
C2	0,74	1,05
C3	0,34	0,44
D1	0,65	0,74
D2	0,73	0,82 – 1,4
D3	0,69	0,83

No ponto D2, o uso da haste milimetrada possibilitou a percepção da alteração do material de fundo, de solo de baixa consistência para estrutura de concreto. A variação de 0,82 para 1,4 metros apresenta-se em formato cúbico, como degraus, e compõe a estrutura de dissipação de energia localizada no intervalo de 20 m iniciais em relação à galeria de águas pluviais.

Para coleta de coordenadas dos pontos de batimetria utilizou-se o mesmo equipamento DGPS, porém com uma nova base, instalada sobre a galeria de entrada Figura 4.14c. Considerou-se que a presença de vegetação densa entre a entrada e a descarga, onde foram alocadas as bases para coleta dos marcos e perfis de elevação, poderia gerar interferência e efeito multicaminho na comunicação entre a base e o *rover*. O *rover* foi alocado na estrutura interna do bote e ocorreu instabilidade no momento da coleta, durante os 3 minutos designados a cada ponto. O movimento natural da água não permitiu a computação adequada das coordenadas nesse intervalo, sendo essas, portanto, desconsideradas. A intenção inicial do levantamento batimétrico foi completar a cobertura de toda a área da bacia de detenção, integrado aos resultados de MDT. As dificuldades apontadas, apesar de não possibilitarem alcançar o resultado almejado, mostram-se importantes por apresentarem dados, antes inexistentes, quanto à variação de profundidade dessa área.

4.2.3 Aquisição de dados VANT

O uso de VANT permitiu obtenção de imagens de alta resolução espacial com objetivo de geração do ortomosaico e do modelo digital de terreno - MDT da região interna da bacia de detenção e comparação com dados obtidos pelas demais técnicas. Os procedimentos para estudos com este equipamento envolvem três etapas principais, que apresentam especificidades individuais. As etapas são: definição de aeronave e câmeras, estas diretamente relacionadas ao produto desejado, coleta de dados em campo e processamento das imagens. (FERREIRA *et al.*, 2013).

O equipamento utilizado foi o DJI Phantom 4 com câmera padrão da aeronave, de resolução 12 *megapixels*. Além da aeronave (Figura 4.16a) são necessários o controle de navegação e um *tablet* (Figura 4.16b) para a configuração da câmera e tempo de aquisição, bem como o planejamento do voo.

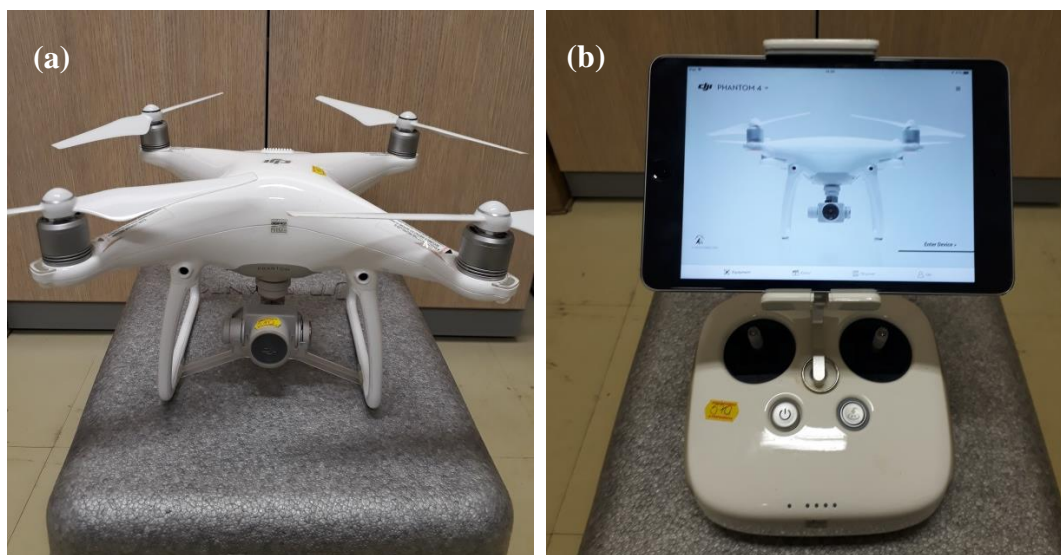


Figura 4.16 - DJI Phantom 4 (a), controlador e *tablet* (b) utilizados no levantamento.

Condições climáticas e equipamentos (componentes e baterias) foram checados nos dias que antecederam o campo, além de uma conferência de campo anterior ao levantamento. A execução ocorreu em dois voos consecutivos, no mesmo dia, tendo em vista a necessidade de adoção de mais de uma bateria para a realização de sobrevoo de toda a área. A durabilidade da bateria pode ser influenciada por condições de voo controladas (ex: altura de voo) e não controláveis (ex: luminosidade, velocidade do vento). Dessa forma garantiu-se que não houvesse interrupção do processo de coleta das fotos ao longo das linhas de voo. As especificações dos voos estão apresentadas na Tabela 4.3. O aplicativo de voo empregado na definição dos parâmetros e execução dos voos foi o *DJI Ground Station PRO*, compatível com o modelo de VANT utilizado (Figura 4.17).

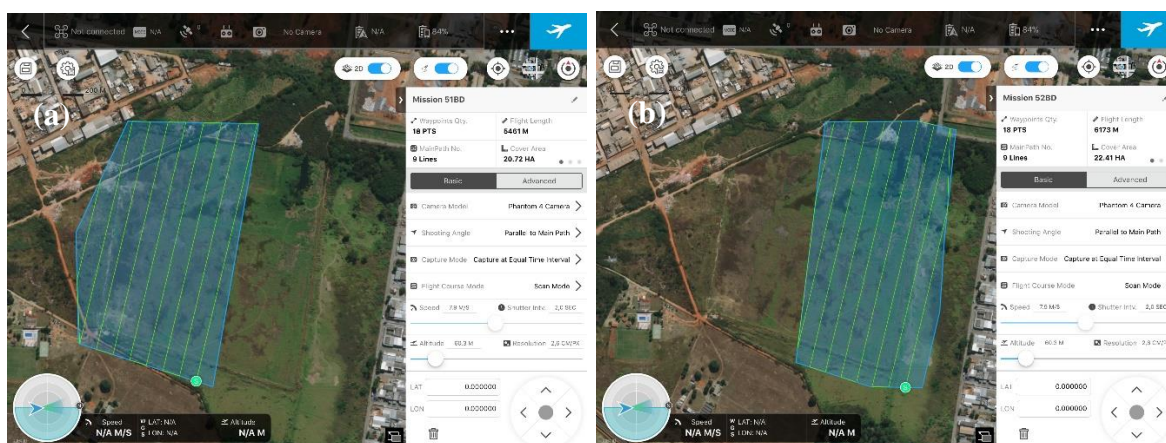


Figura 4.17 - Planos de voo 1 (a) e 2 (b) no aplicativo *DJI Ground Station PRO*.

Tabela 4.3 - Características dos voos com Phantom 4.

Características do Voo	Valores Voo1	Valores Voo2
Área recoberta pelo conjunto de fotos	20,72 ha	22,41 ha
Número de fotos	335	358
Velocidade média de voo	7,9 m/s	
Intervalo de tomada das fotografias	2 seg	
Altura do voo em relação à base	60,3 metros	
Resolução espacial das fotos (GSD)	2,51 cm/px	
Linhas de voo executadas	9	
Recobrimento longitudinal (planejado)	80%	
Recobrimento lateral (planejado)	60%	
Resolução espacial do MDS	1 x GSD = 2,51 (cm/pixel)	
Resolução espacial do MDT	5 x GSD = 12,55 (cm/pixel)	

4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados coletados em campo foram processados de acordo com suas particularidades. Para maior precisão e fidelidade com o comportamento real, os dados DGPS foram trabalhados com adequação IBGE PPP e IBGE RBMC. O processamento foi feito por meio do *software Trimble Business Center* (TBC). Quanto às fotografias aéreas obtidas com VANT, seu processamento e associação a pontos de controle e de verificação deu-se por meio do *software Pix4D Mapper*. O mecanismo de obtenção de valores de área e volume para os MDTs através da utilização do ArcGIS 10.3 também é discriminado.

4.3.1 Correção de dados DGPS

Uma vez coletados os pontos, os dados foram exportados com uso de mídia removível. Antes do processamento dos dados no *software Trimble Business Center* (TBC), foi preciso realizar a correção das bases dos dias 18 e 25 de agosto (Figura 4.18).

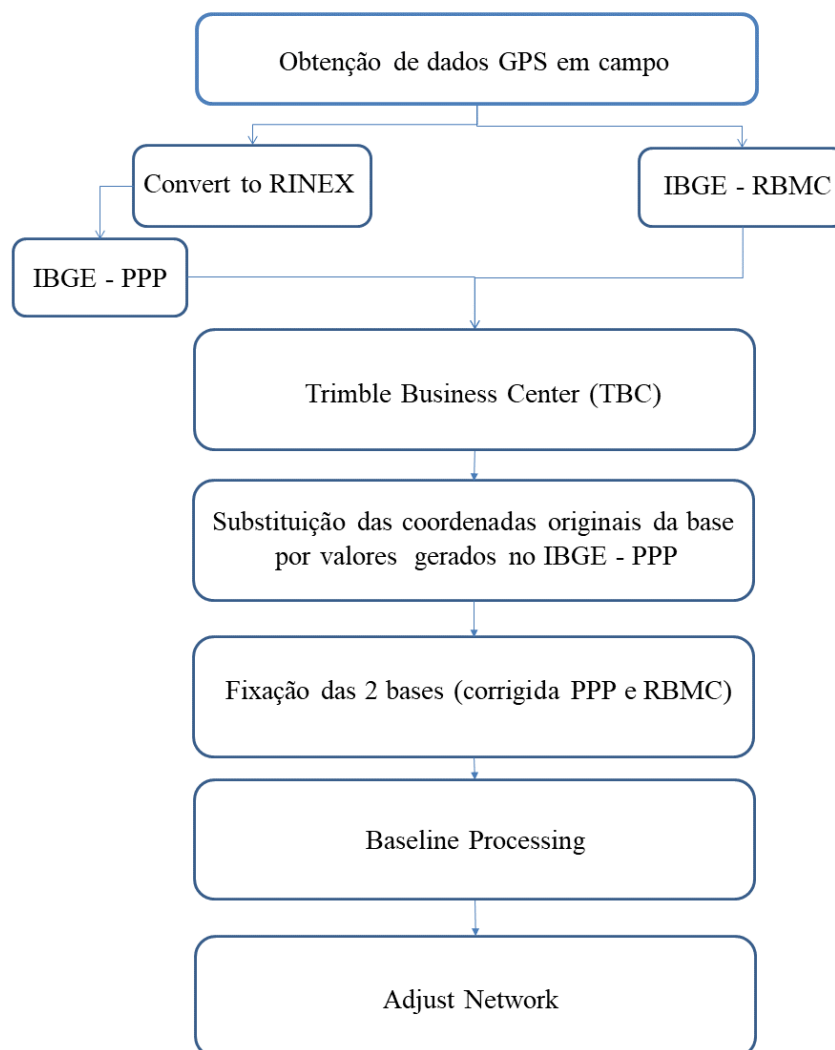


Figura 4.18 - Fluxograma de processamento dados GPS.

Apesar de utilizar o método RTK, a base foi obtida no momento da coleta, com identificação em tempo real. O ideal é a obtenção e correção da base *a priori* ao levantamento. Para garantir a qualidade dos dados, esses foram submetidos a pós processamento, conforme procedimento descrito a seguir e apresentado na Figura 4.18. A obtenção das coordenadas dos 4 perfis foi efetuada com valores corrigidos da base de

25/08/2018. A correção das duas bases requer a conversão para o formato RINEX, a partir do componente do software TBC, “*Convert to RINEX*”. Esse é o formato de entrada para o serviço *online* e gratuito de pós processamento de dados GNSS do IBGE, o IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). O serviço faz uso do programa CSRS-PPP (GPS *Precise Point Positioning*) desenvolvido pelo NRCan (*Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada*) (IBGE, 2018). A correção de coordenadas requer modelo e altura da antena, e-mail válido e tipo de levantamento realizado (estático ou dinâmico), além do arquivo RINEX referente às coordenadas da base. O resultado, constituído de 5 arquivos, é disponibilizado em poucos minutos.

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) consiste em estações geodésicas distribuídas pelo país, com disponibilização de informações diárias ou em tempo real, para determinação de coordenadas. As estações são equipadas com receptores GNSS de alto desempenho. A aplicação de GNSS à topografia implica na utilização do método relativo, ou seja, a presença de pelo menos uma estação de coordenadas conhecidas simultaneamente à coleta dos pontos em campo. Essa é a função das estações RBMC, pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Uma vez criado projeto no TBC e definido sistema de coordenadas (SIRGAS 2000 zona UTM 23S), são inseridos dados de ambas bases (coletada e RBMC) e dos pontos coletados. As bases devem ser alteradas com os valores corrigidos de coordenadas e fixadas (controle de qualidade). Após seleção de todos os pontos implementou-se o “*Processing Baselines*”. No relatório gerado após o processo é possível observar se os pontos estão devidamente ajustados, como denominação “*Fixed*”, ou se apresentam alguma inadequação “*Float*”. A importância desse ponto deve ser considerada, resultando em exclusão ou necessidade de nova coleta em campo. Durante o processamento dos dados apenas 3 pontos apresentaram esse desvio e foram eliminados sem prejuízo aos resultados. A seguir, foi empregada a ferramenta “*Adjust Network*”, para ajustamento dos pontos às duas bases fixadas. O relatório dessa etapa apresenta os desvios padrões das coordenadas em X, Y e Z, além das coordenadas em GMS e UTM. A Figura 4.19 apresenta o espaço de trabalho do no software TBC para dados do dia 25/08, para exemplificação.

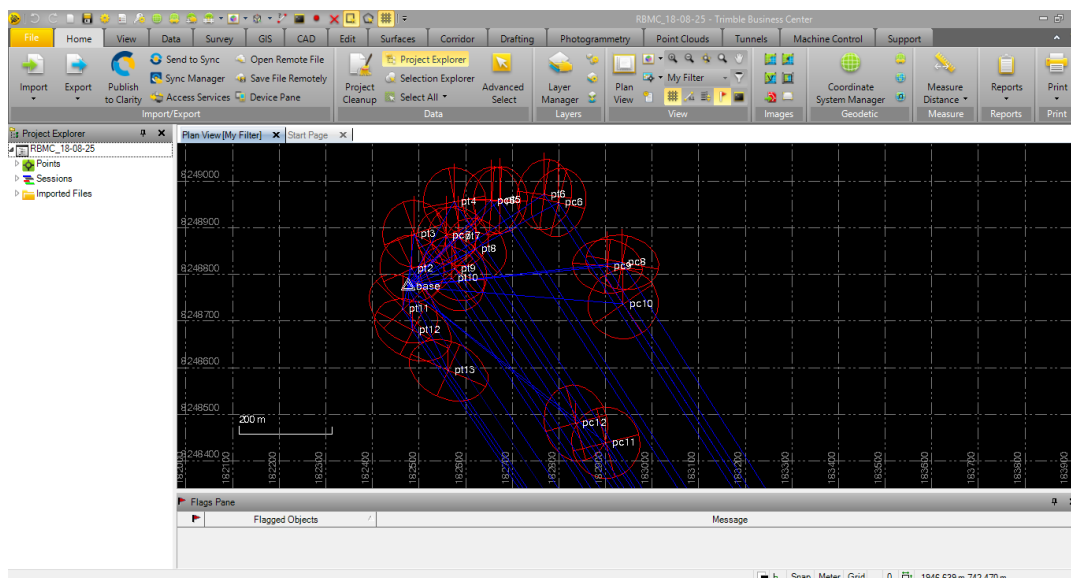


Figura 4.19 - Espaço de trabalho software TBC.

Na Tabela 4.4 abaixo é possível observar os valores de desvio padrão para os marcos utilizados no processamento fotogramétrico. Esses valores foram considerados aceitáveis pela pequena variação.

Tabela 4.4 - Desvios-padrões obtidos pelo processamento das coordenadas referentes aos marcos fotointerferíveis, com presença de base RBMC.

Ponto	Desvio Padrão Leste (m)	Desvio Padrão Norte (m)	Desvio Padrão Altura (m)
base 18/08	fixo	fixo	fixo
base 25/08	fixo	fixo	fixo
BRAZ (RBMC)	fixo	fixo	fixo
pc1	0,010	0,008	0,029
pc2	0,010	0,009	0,028
pc3	0,010	0,010	0,021
pc4	0,010	0,011	0,020
pc5	0,007	0,008	0,028
pc6	0,007	0,009	0,031
pc7	0,008	0,008	0,031
pc8	0,008	0,006	0,022
pc9	0,008	0,006	0,023
pc10	0,008	0,008	0,022
pc11	0,008	0,008	0,016
pc12	0,007	0,009	0,016
média	0,008	0,008	0,024

A altitude obtida pela aplicação de um receptor GNSS, como o Trimble R8s, é baseada em um elipsoide de referência com dimensões específicas e comportamento uniforme. Contudo, essa elevação, geométrica, não está relacionada ao nível do mar, ou ao geóide, com ondulações características e que devem ser conhecidas para maior acurácia em projetos de mapeamento e engenharia.

Um mesmo ponto pode apresentar, portanto, duas altitudes. A geométrica (h), definida pela distância vertical deste ponto ao elipsoide tomado como referência para o mapeamento e a ortométrica (H), definida pela distância vertical deste ponto ao Nível Médio do Mar (NMM) (SAMPAIO; BRANDALIZE, 2018).

A conversão da altitude elipsoidal (h), obtida através de receptores GNSS, em altitude ortométrica (H), deve utilizar o valor da altura geoidal (N) fornecida por um modelo de ondulação geoidal, conforme expressão da Figura 4.20.

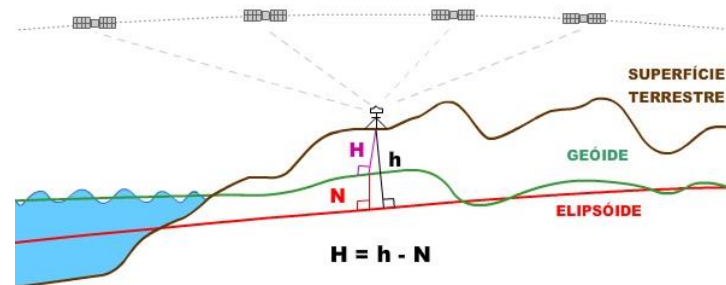


Figura 4.20 – Determinação da altitude ortométrica (H). Fonte: IBGE (2018).

A Figura 4.21 abaixo consiste no fluxograma do processo de correção ortométrica dos pontos GPS.

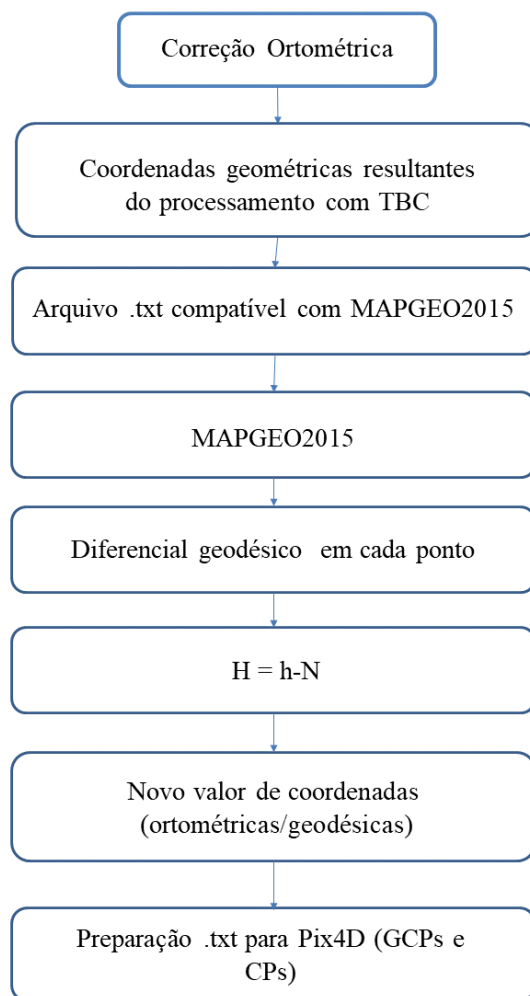


Figura 4.21 - Fluxograma de Correção Ortométrica de pontos GPS.

Para obtenção da altura geoidal (N) os valores de altura elipsoidal (h) foram inseridos no programa MAPGEO2015, disponível gratuitamente para *download* e uso *online*, na seção “Modelo de Ondulação Geoidal”, na página do IBGE. O programa permite a entrada de dados GMS e Grau decimal e esses devem estar organizados de forma compatível e extensão txt. Os dados de entrada são resultantes dos processamentos realizados no TBC nos eixos X e Y. Os valores de N encontrados variam de -12,32 a -12,33 metros para a área em estudo, com valor de -12,46 para a base RBMC utilizada. Considerando se tratar de uma análise do acúmulo de sedimentos, variações em escala métrica podem comprometer a acurácia. O valor da altura geoidal é subtraído da altura elipsoidal para que se encontre a altura ortométrica (H). Esses novos valores de coordenada no eixo Z foram considerados para os marcos, pontos de controle e inseridos na criação do MDT, via processamento das imagens obtidas pelo VANT.

4.3.2 Processamento VANT

Para realização desta etapa optou-se pelo uso do *software Pix4D Mapper* disponível no LSRAE do IG/UnB. Esse *software* tem seu processamento dividido em três partes: (1) *Initial Processing*, (2) *Point Cloud and Mesh* e (3) *DSM, Orthomosaic and Index*. A Figura 4.22 apresenta o fluxograma do processamento.

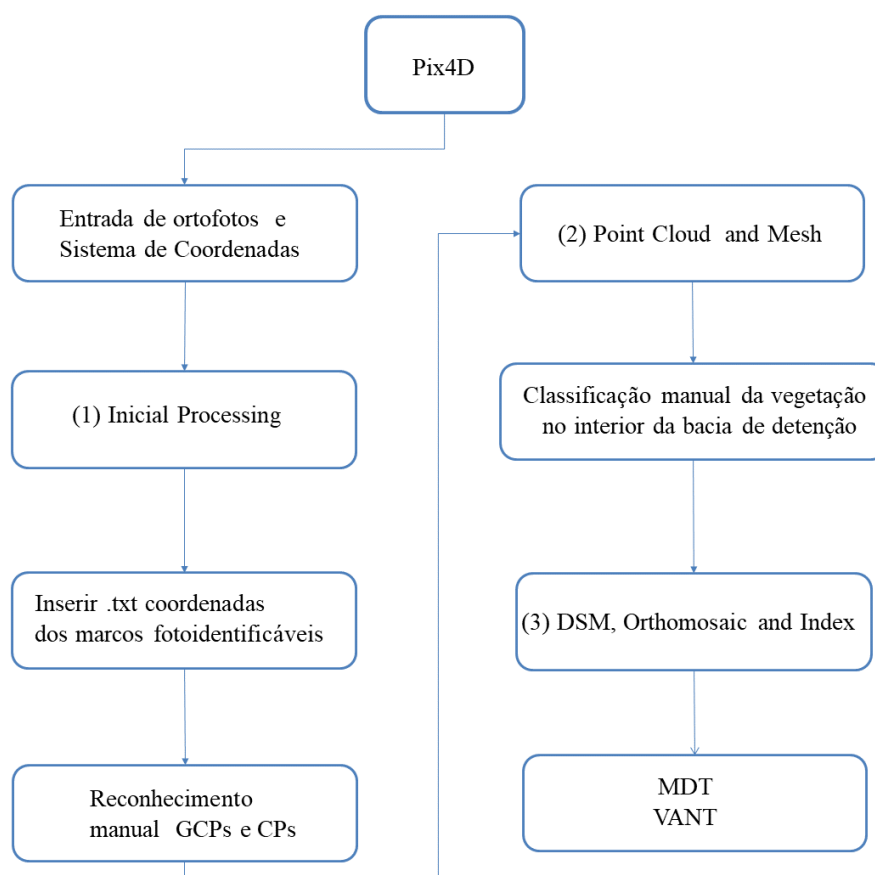


Figura 4.22 - Fluxograma de processamento no programa *Pix4D Mapper*.

Primeiramente, determina-se o sistema de coordenadas, no momento de inserção das fotos obtidas no voo é iniciado o Processamento Inicial. O relatório de processamento, um dos produtos do processamento, apresenta dados acerca da adequação dos dados de entrada para atestar viabilidade de seu uso para etapas seguintes. Um dos fatores é a sobreposição das imagens. A Figura 4.23, referente aos dados em estudo, ilustra bem a

importância de manter a cobertura de voo em uma área além da desejada devido a distorções e perda de informação nas bordas.

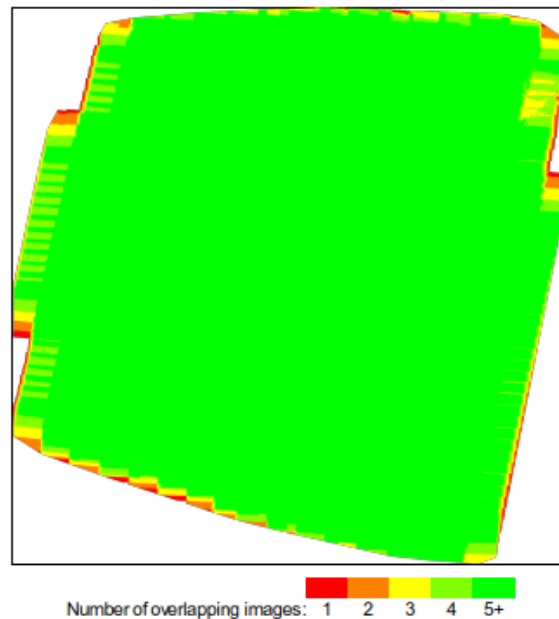


Figura 4.23 - Número de imagens sobrepostas segundo relatório de processamento.

São apresentadas também informações acerca das conexões identificadas entre imagens. Zonas de coloração mais escura indicam maior identificação de feições enquanto tons mais claros, menor identificação. As elipses de coloração verde indicam as incertezas do posicionamento relativo da câmera em relação ao resultado do ajustamento. Das 710 imagens inseridas, 709 foram calibradas com sucesso. A única inadequação está explicitada na Figura 4.24 com marcação em vermelho. Localiza-se próxima às bordas e é composta por vegetação arbórea densa, o que respectivamente aumenta a susceptibilidade a distorções e dificulta a amarração de feições entre fotografias, por ser uniforme. Por não afetar a área em estudo a sua presença foi desconsiderada.

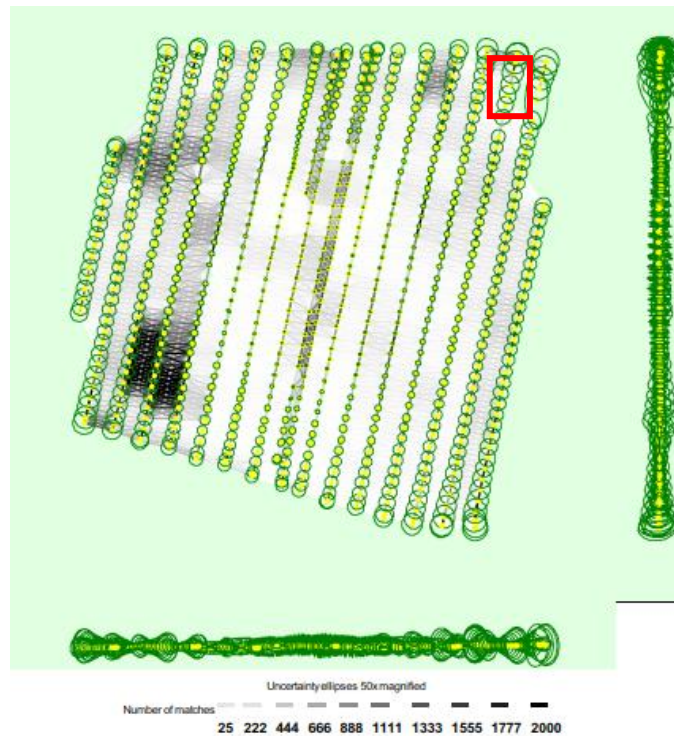


Figura 4.24 - Conexões entre ortofotos de voo VANT.

Após processada a fase (1) são alocados os *GCPs* (*Ground Control Points*) e os *CP* (*Check Points*), a diferenciação das duas modalidades acontece no momento de entrada dos dados. Ambos consistem em pontos fotoidentificáveis e suas coordenadas foram obtidas em campo com equipamento GPS. São utilizadas para coordenada Z (altimetria) os valores corrigidos de altura ortométrica conforme procedimento descrito anteriormente. Os produtos gerados pelo *software Pix4D Mapper* associam automaticamente esses valores de coordenada para valores altimétricos. É possível inserir as coordenadas X, Y e Z obtidas no levantamento, com Trimble R8s em campo, via arquivo de texto. Os pontos são automaticamente alocados nas proximidades dos marcos instalados e podem ser ajustados manualmente, caso necessário. Para cada ponto foi empregada atribuição manual em quatro ortofotos, com reconhecimento automático para as demais. Após a atribuição descrita, deve-se aplicar a opção *Reoptimize* para que essas atualizações sejam contabilizadas nas etapas seguintes. Dos 13 marcos instalados, sendo um deles correspondente à base, cinco foram utilizados como pontos de verificação e, com os demais, foram criados três casos em relação à quantidade de pontos de controle. Variou-se o número de pontos de controle entre: nenhum, 4 e 8, com objetivo de analisar as diferenças dos produtos gerados em cada uma dessas condições. A disposição dos marcos por caso está representada na Tabela 4.5 e a distribuição espacial na Figura 4.25.

Tabela 4.5 - Pontos de controle e de verificação por cenário.

Caso	Número de pontos de Controle (GCPs)	Pontos de Controle (GCPs)	Número de Pontos de Verificação (CPs)	Pontos de Verificação (CPs)
Caso 1	0	-	5	pc2, pc3, pc4, pc9, pc12
Caso 2	4	base, pc7, pc8, pc11		
Caso 3	8	base, pc7, pc8, pc11, pc1, pc5, pc6, pc10		

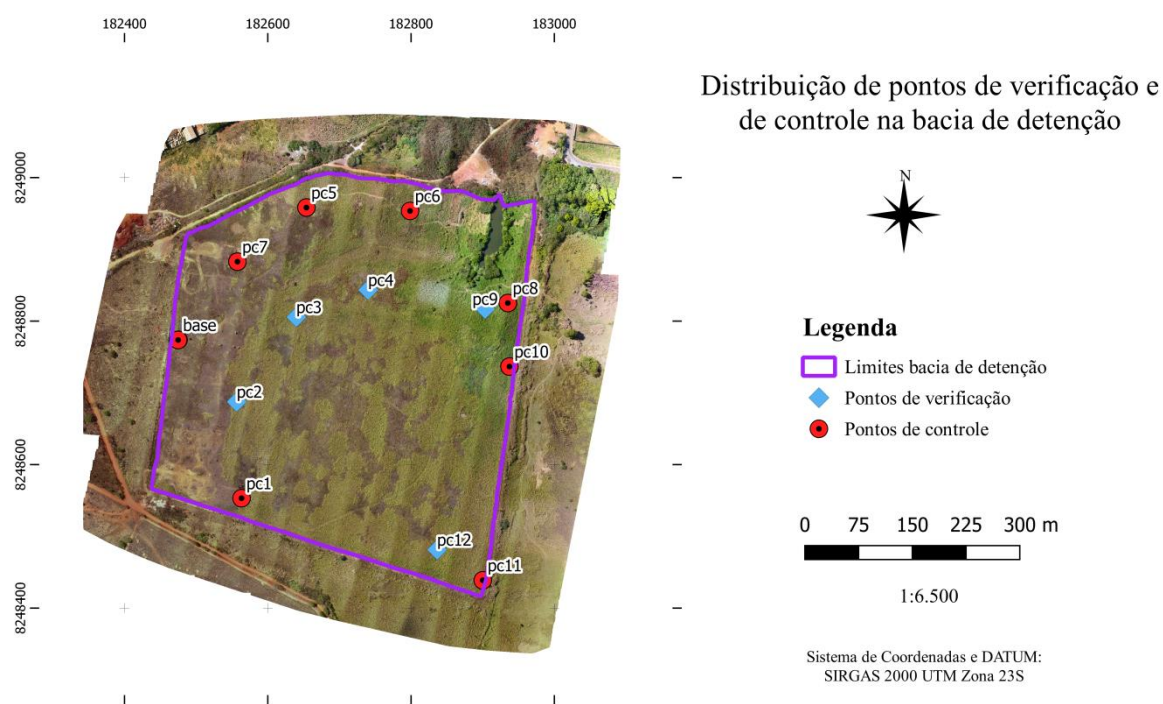


Figura 4.25 - Distribuição de ponto de controle e de verificação na bacia de detenção.

É importante ressaltar que os pontos de verificação devem ser adequadamente discriminados como tal para etapas posteriores de processamento. A utilização resulta em contabilização no processo estatístico de ajustamento. Suas coordenadas e precisão influenciariam os resultados finais, inviabilizando sua função de verificação da exatidão

dos produtos finais do processamento. Na Figura 4.26 estão apresentados os pontos associados à nuvem densa de pontos.

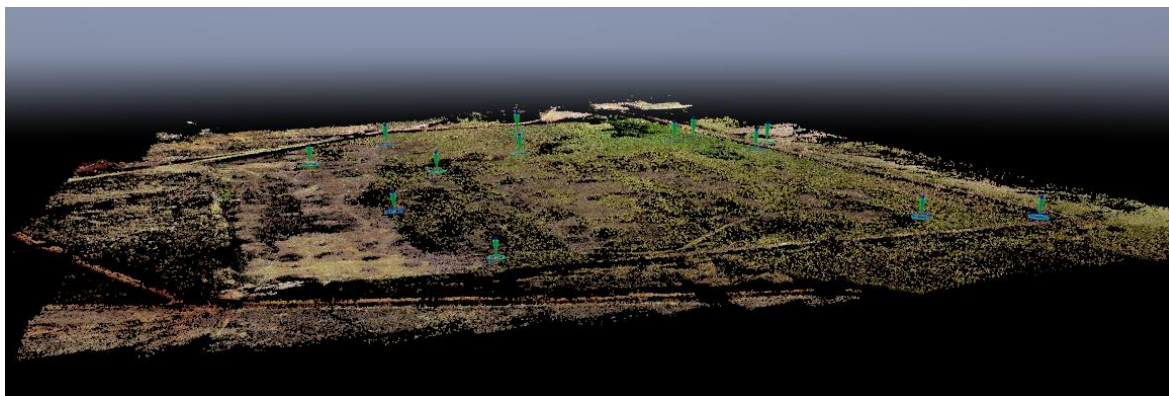


Figura 4.26 – GCPs e CPs sobre nuvem densa de pontos.

A nuvem de pontos gerada automaticamente na fase (2) *Point Cloud and Mesh* não levou em consideração a diferença entre a vegetação do interior da bacia de detenção e o solo no fundo. O processo de geração do MDT, a partir da nuvem de pontos, preserva apenas os valores originais atribuídos às classes *Ground* e *Roads Surface*. As demais classes serão apresentadas como uma suavização do MDS.

Desta forma, antes de proceder para a etapa (3) é importante a classificação manual e filtragem das áreas com vegetação do interior da bacia de detenção, em busca de maior precisão. A ausência desse processo interfere nos produtos e será tratada no tópico referente aos resultados. Essa classificação não foi aplicada para os produtos finais deste estudo. O software em questão não se mostrou eficiente para situação de vegetação densa, uma vez que não podem ser atribuídos valores de altimetria a cada classe.

Para a geração do MDS, no terceiro passo, para em seguida ser obtido o MDT, foi aplicado o método da Triangulação ao invés do Inverso da Distância Ponderada (IDP). Apesar de ser o padrão de processamento do *software*, o segundo método é mais adequado para áreas urbanas, enquanto a Triangulação é mais indicada para regiões com árvores e cobertura vegetal, como no caso da área em estudo (Pix4D, 2018).

Quanto às ortofotos obtidas nos dois voos que compuseram o ortomosaico, a configuração do balanço de branco (WB) em automático resultou em ajuste, pelo equipamento, à quantidade de luz ambiente, ocasionando variação na temperatura das

fotos: coloração alaranjada (FIGUEIREDO; FIGUEIREDO, 2018). Para correção e uniformização foi aplicado o *software Lightroom Photoshop*. Na Figura 4.27 estão apresentados os ortomosaicos gerados com as ortofotos originais (a) e as corrigidas (b). Recomenda-se que as configurações de balanço de branco não sejam alteradas, permitindo que os parâmetros façam ajustes durante o voo.

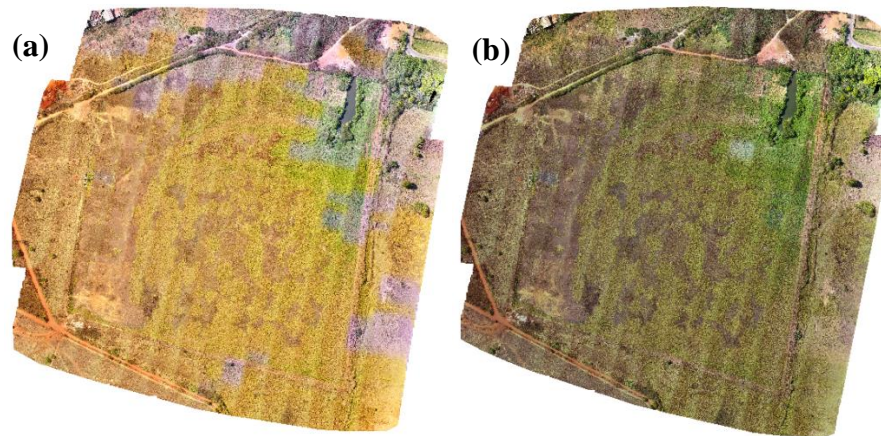


Figura 4.27 - Correção da coloração do ortomosaico obtido com VANT.

Foi mantido, todavia, um “efeito de linha” nas imagens, que pode ser observado na Figura 4.27 no sentido vertical do ortomosaico. Esse efeito foi provocado por variação de luminosidade entre as extremidades direita e esquerda de cada ortofoto (Figura 4.28). Esse efeito não apresenta prejuízos à geração de MDT, enfoque desse estudo, opta-se, portanto, pela utilização do ortomosaico processado.

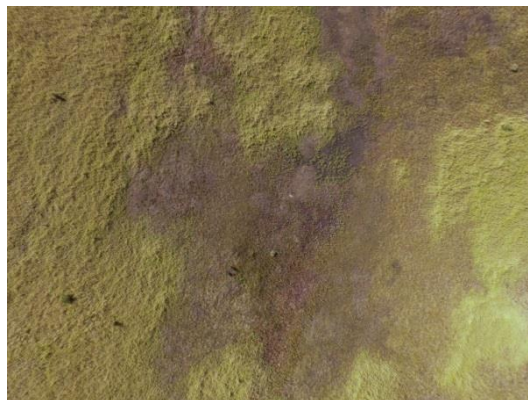


Figura 4.28 - Variação de luminosidade em ortofotos.

4.3.3 Processamento LiDAR

Os dados do LiDAR foram obtidos entre 14 e 15 de março de 2016 e são provenientes de levantamento da empresa TOPOCART via Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília (UnB), por meio de solicitação à TERRACAP. Em relação ao índice de articulação das folhas no SICAD (Sistema de Cartográfico do Distrito Federal), em escala de 1:2000, a bacia de detenção em estudo está englobada nas folhas com códigos 136-IV-1-A, 136-IV-1-B, 136-IV-1-C, 136-IV-1-D, constituintes da ÁREA 4. O MDT produzido pelo corpo técnico da empresa apresenta um pixel de tamanho 0,5 m e foi utilizado como dado secundário neste estudo. Devido à precisão elevada desse tipo de levantamento, a altimetria que constitui o MDT foi considerada padrão na comparação com valores obtidos pelo processamento com VANT.

4.3.4 Comparação entre Modelos Digitais de Terreno

O levantamento de dados LiDAR foi realizado pela empresa TOPOCART entre 14 e 15 de março de 2016. Essa data compreende período posterior às chuvas. Já o levantamento com o VANT foi feito no dia 4 de setembro de 2018, fim do período de seca na cidade de Brasília. Esse contraste temporal e consequentemente nos índices pluviométricos aponta para um potencial contraste da vegetação presente no interior da bacia de detenção em estudo.

Por serem produtos gerados por técnicas diferentes com pontos de controle não correspondentes é importante que se façam validações planimétrica e altimétrica dos Modelos Digitais de Terreno. Para tanto foram inicialmente identificadas as variações em X e Y (planimétrica) entre as coordenadas obtidas em campo com o GPS e valores correspondente para o mesmo ponto no MDT do LiDAR por identificação visual e seleção manual. Uma vez garantida adequação planimétrica em relação à PEC, descrita a seguir, foram conferidos os valores altimétricos Z também submetidos à norma. O mesmo procedimento foi empregado no MDT obtido por VANT.

A Diretoria do Serviço Geográfico do exército brasileiro (DSG), através da publicação de Especificações Técnicas de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), estabelece procedimentos para avaliação de acurácia posicional de produtos cartográficos. Produtos cartográficos digitais fazem parte das atualizações das ETs e a

esses devem ser atribuídos valores mais restritivos. O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e o Erro-Padrão (EP), especificados no Decreto-Lei 89.817 de 1984, são a base para atribuição de classes às diferentes escalas de trabalho. A verificação é feita pela comparação (diferença) dos valores de coordenadas que se deseja avaliar com relação aos valores de coordenadas de referência obtidos em levantamento de campo de alta precisão.

Em relação a valores tabelados para PEC-PCD, 90% dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico, quando comparados com as suas coordenadas de referência, devem apresentar os valores iguais ou inferiores aos tabelados para escala de trabalho em questão. Os valores de EP não deverão, da mesma forma, exceder limites tabelados e correspondem ao desvio padrão dos erros.

As escalas são: 1:1.000; 1:2.000; 1:5.000; 1:10.000; 1:25.000; 1:50.000; 1:100.000 e 1:250.000. De acordo com a acurácia do produto cartográfico digital esse será enquadrado nas classes “A”, “B”, “C” ou “D” em determinada escala.

O software GeoPEC versão 3.5, uma ferramenta gratuita de interface intuitiva, foi empregado para determinação da adequação aos dados à norma, uma vez que a partir da entrada de coordenadas X, Y, Z de referência e de teste o programa é capaz de fornecer:

- acurácia posicional de produtos cartográficos utilizando o Decreto nº. 89.817 aliada à ET-CQDG;
- inspeção topográfica através da NBR 13.133;
- avaliação de ortofotos de aerolevantamento e bases cartográficas utilizadas no processo de Georreferenciamento de Imóveis Rurais segundo Norma de Execução n. 02 de 2018 do INCRA (GEOPEC, 2019).

4.3.5 Curva Cota x Área x Volume

Para determinação da relação Cota x Área x Volume foi empregado o *software* ArcGIS 10.3. Os MDTs analisados foram, para o VANT, o resultante do Caso 3 e para o levantamento LiDAR foi considerado produto gerado pela TERRACAP. Todo o projeto encontra-se em SIRGAS2000 UTM 23S. Inicialmente, foi criado polígono compreendendo apenas região interna da bacia de detenção, base para recorte dos dois MDTs, via ferramenta *Clip* do ArcGis. Prosseguiu-se com ativação do *3D Analyst*, função que permite a criação de perfis de elevação.

Os perfis foram criados a partir de linhas (*shapefile*) traçadas sobre os pontos correspondentes à coleta de perfis topográficos em campo com o GPS Trimble R8s. Com uma linha para cada um dos quatro perfis utilizou-se a ferramenta “Stack Profile”, localizada em 3D Analyst Tools > Functional Surface > Stack Profile. Esta ferramenta, uma vez ativado modo de edição para a linha de interesse, torna possível seleção simultânea dos arquivos *raster* de projeto dos quais se deseja obter o perfil. Os produtos apresentam-se na forma de um gráfico e um arquivo em formato de tabela de atributos com informações altimétricas em pequenos intervalos das camadas estudadas.

Os gráficos dos perfis serão apresentados no item 5.1. Os valores máximos e mínimos das cotas altimétricas componentes das tabelas de atributos, tomados a um intervalo de 0,01 m, são dados de entrada para determinação dos dados de área e volume almejados.

A ferramenta *Surface Volume* (3D Analyst Tools > Functional Surface > Surface Volume) realiza o cálculo de área e volume da região entre uma superfície e um plano de referência. São considerados intervalos “acima de” Above ou “abaixo de” (Below) de cada cota, gerando tabela de atributos com valores de cota, área em 2D, área em 3D e volume. Entretanto, a entrada de dados é limitada a um intervalo por vez. Como o interesse deste projeto é a análise do comportamento de sedimentos, estão envolvidos intervalos de cota pequenos (0,01 m) e há necessidade de obtenção de valores de área e volume para toda a região da bacia de detenção. Desta forma, foi adicionada uma ferramenta à *ArcGIS Toolbox*, a *ArcGIS Loop Surface Volume* (ou *Multi-Volumes*). Essa ferramenta é capaz de executar repetidamente a *Surface Volume* já descrita, uma vez delimitados valores máximos e mínimos de cota e o intervalo de cálculo. Valores de máximo e mínimo foram extraídos dos gráficos de perfil topográfico apresentados em resultados e discussão, item 5.3. Essa ferramenta foi disponibilizada por Gerry Gabrisch, gerente em GIS, em <https://github.com/gerry1138/ArcGIS-Loop-Surface-Volumes> com componentes em formatos: ArcGIS Toolbox, Python e texto e é empregada nos projetos:

- *The Shoreline Management Tool-Na ArcMap Tool for Analysing Water Depth, Inundated Area, Volume, and Selected Habitats, with an Example for the Wood River Valley, Oregon – United States Geologic Survey.*
- *Lake Whatcom Bathymetry Report – Institute for Watershed Studies, Bellingham, WA.*

Para sua utilização deve-se adicionar o arquivo em formato ArcGIS Toolbox (MultiVolumes) e criar um novo Script capaz de incorporar o programa desenvolvido em Python ao Arcmap. A Figura 4.27 apresenta a determinação dos dados de entrada e saída do script criado para este estudo (a) e o modelo pronto para obtenção dos valores desejados de cota, área e volume (b).

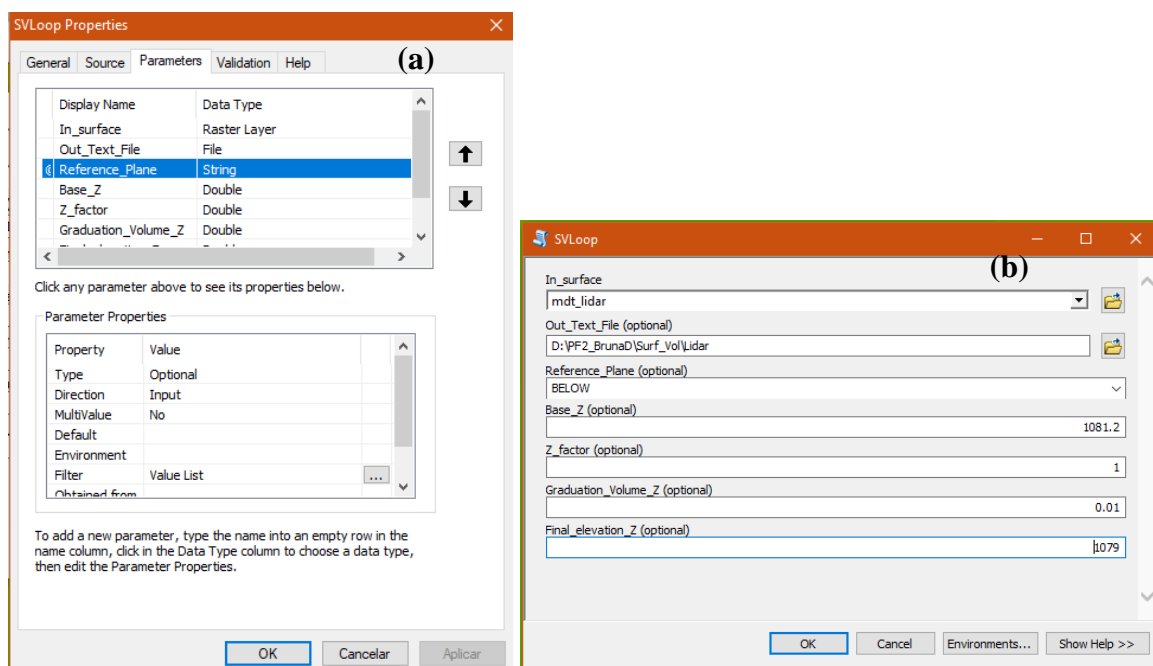


Figura 4.29 - Determinação dos dados de entrada e saída do novo script (a) e script gerado para uso do programa (b).

Os dados foram empregados na determinação das curvas Cota x Área e Cota x Volume com objetivo de comparação entre as duas formas (VANT e LiDAR) de obtenção de MDT. O detalhamento será apresentado na seção de resultados e discussão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo trata da análise dos produtos resultantes dos processamentos dos dados primários e secundários utilizados neste estudo. São apresentados os perfis obtidos em campo com o equipamento Trimble R8s. Para os MDTs gerados a partir do voo com VANT são determinados três casos com variação no número de pontos de controle. Tendo em vista o objetivo do projeto são comparados os MDTs (VANT e LiDAR) e determinada relação Cota x Área x Volume entre os dois modelos e entre o reservatório, a bacia de detenção em estudo.

5.1 Perfil topográfico obtido com GPS

A Tabela 5.1 apresenta nome e número de pontos de cada perfil, além do valor da média calculada a partir dos erros atribuídos a cada ponto no relatório final do *software* TBC.

Tabela 5.1 - Número de pontos e média dos erros dos perfis altimétricos.

Nome do perfil	Número de pontos	Média dos erros processamento TBC (m)
Perfil PP	16	0,061
Perfil PQ	16	0,036
Perfil PS	17	0,049
Perfil PL	14	0,030

A localização dos perfis está sistematizada no mapa da Figura 5.1. O sentido de coleta dos pontos em campo foi variado, mas todos os dados foram reorganizados de forma que os perfis PP e PL seguem de norte para sul e os perfis PQ e PS de oeste para leste (esquerda para direita).

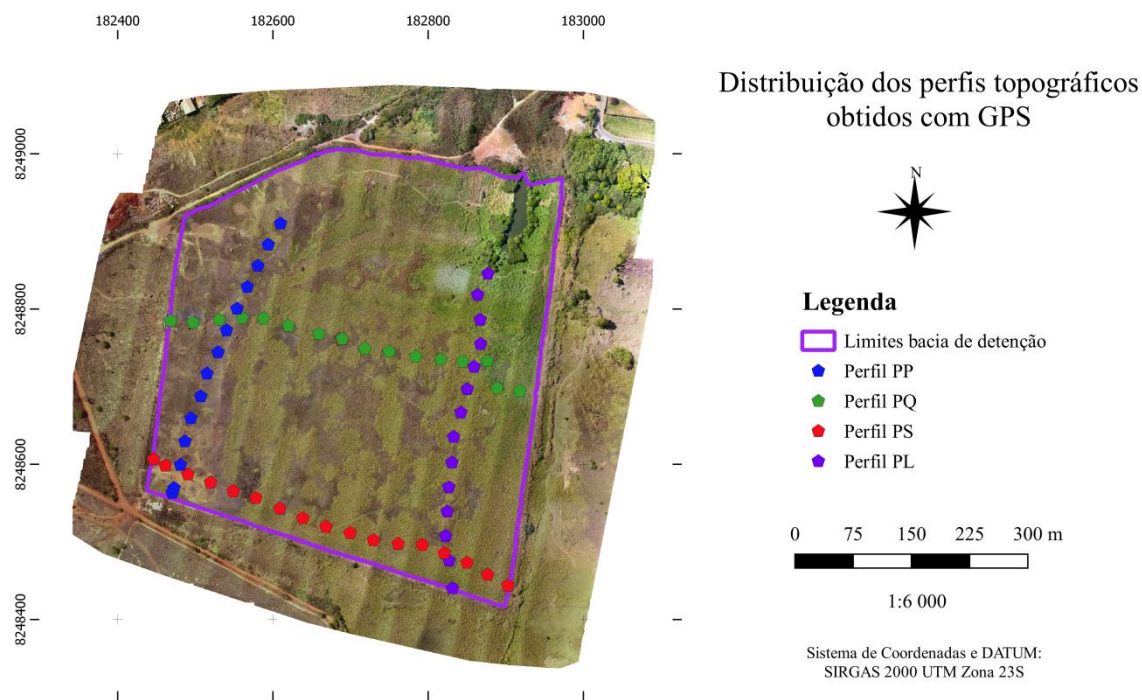


Figura 5.1– Distribuição dos perfis altimétricos obtidos com GPS.

As distribuições espacial e altimétrica dos perfis, assim como o valor médio dos erros por perfil, estão representadas nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5. Entre os perfis PS (vermelho) e PQ (verde) é possível observar maior suavidade na variação altimétrica para PS. Por estar localizado à borda mais distante da entrada da bacia de detenção a distribuição de sedimentos tende a ser mais uniforme, ainda que isso represente ausência de acúmulo nessa região. O traçado de PQ abrange região mais central, exposta a maior influência da ação do fluxo de água, seja resultando em acúmulo ou em escavação do solo. Os perfis PL (roxo) e PP (azul) apresentam comportamento semelhante. A maior constância do perfil PL leva a crer que o fluxo de água no interior da bacia de detenção pode percorrer rota diagonal desde a área alagada à entrada até a estrutura de saída paralela ao perfil PP. Esse comportamento aponta para potencial ocorrência curto-circuito pela tomada de caminhos preferenciais. Esse fenômeno pode ser responsável pela redução da sedimentação estimada em projeto com prejuízos ao desempenho quanto à quantidade e à qualidade.

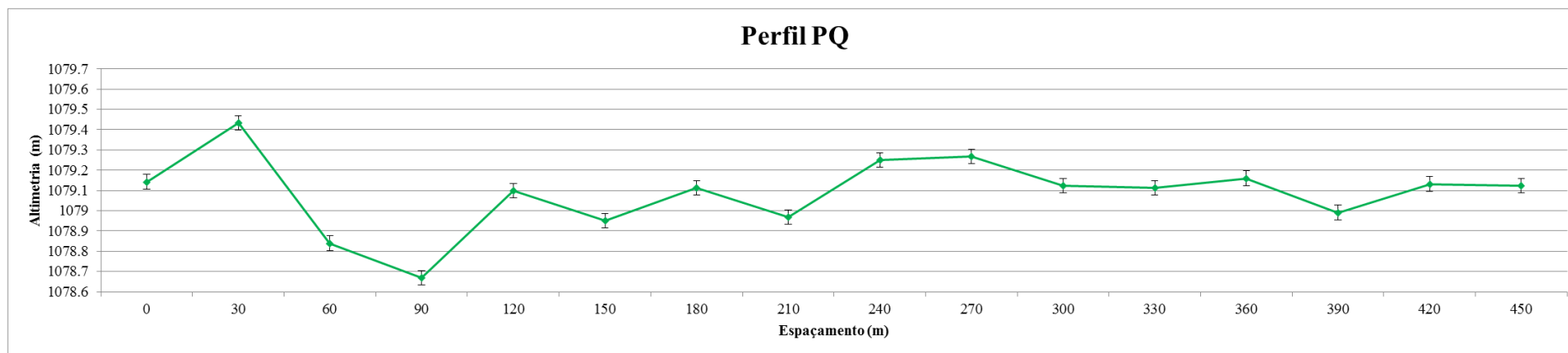


Figura 5.2 - Perfil de elevação PQ.

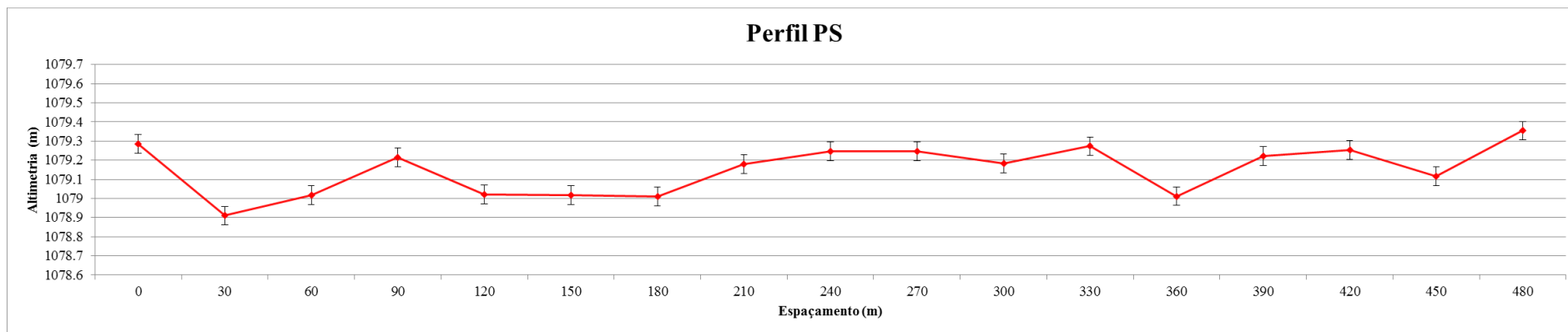


Figura 5.3 – Perfil de elevação PS.

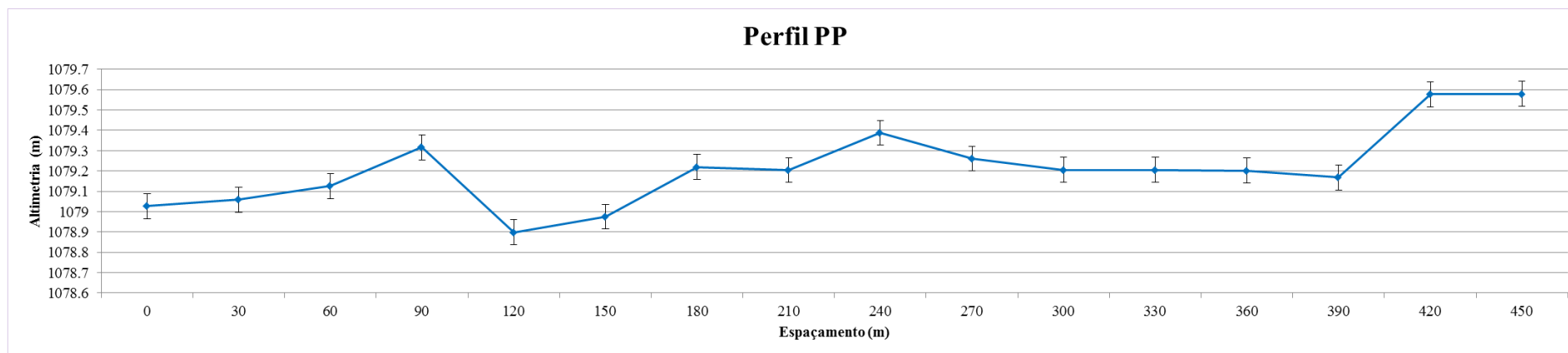


Figura 5.4– Perfil de elevação PP.

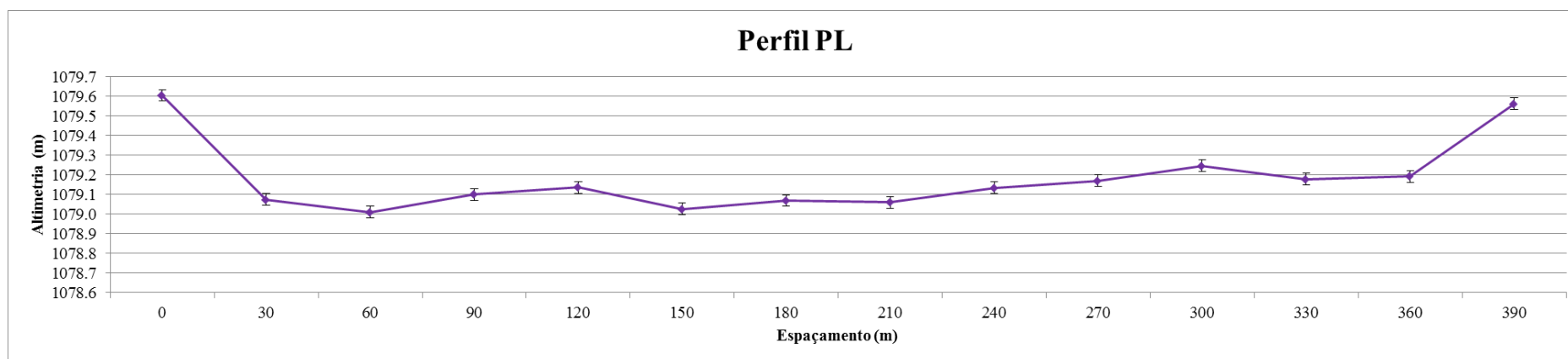


Figura 5.5 - Perfil de elevação PL.

5.2 Modelo Digital de Terreno - VANT

Os MDTs gerados a partir da variação do número de pontos de controle (Casos 1, 2 e 3), sem processo de classificação da nuvem de pontos, podem ser observados nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 abaixo.

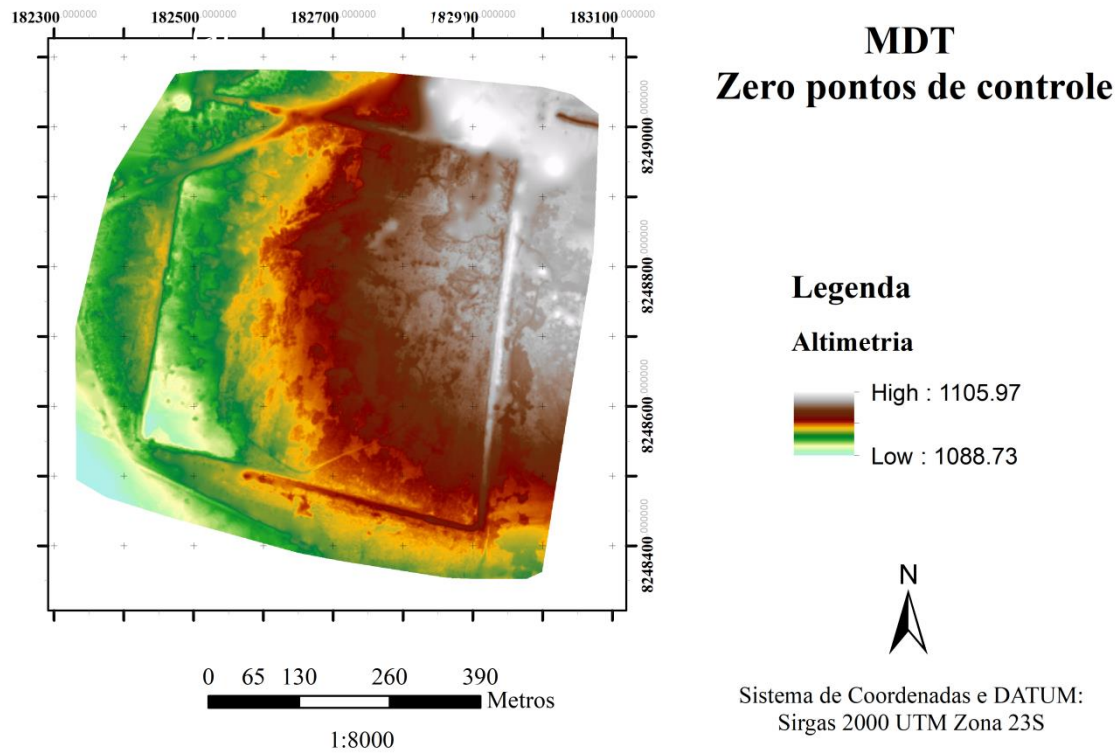
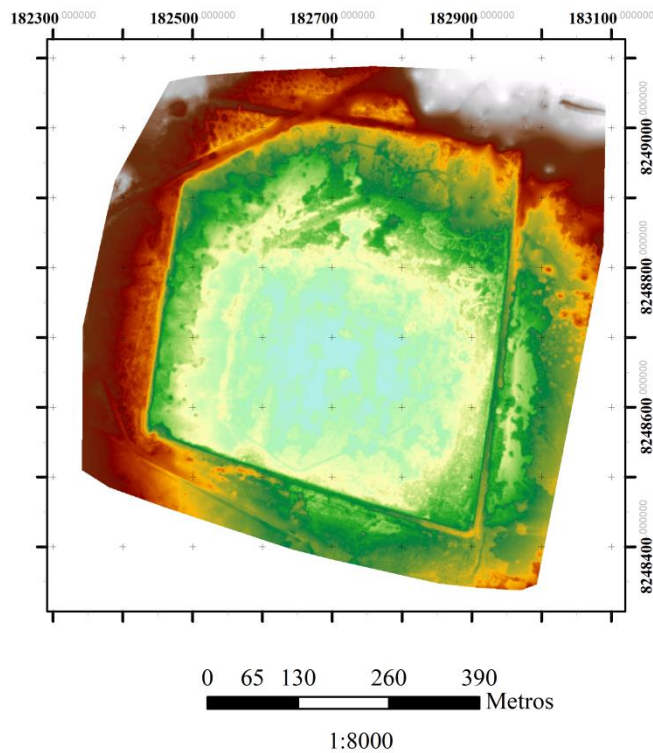


Figura 5.6 - MDT referente ao Caso 1, zero pontos de controle.



MDT 4 pontos de controle

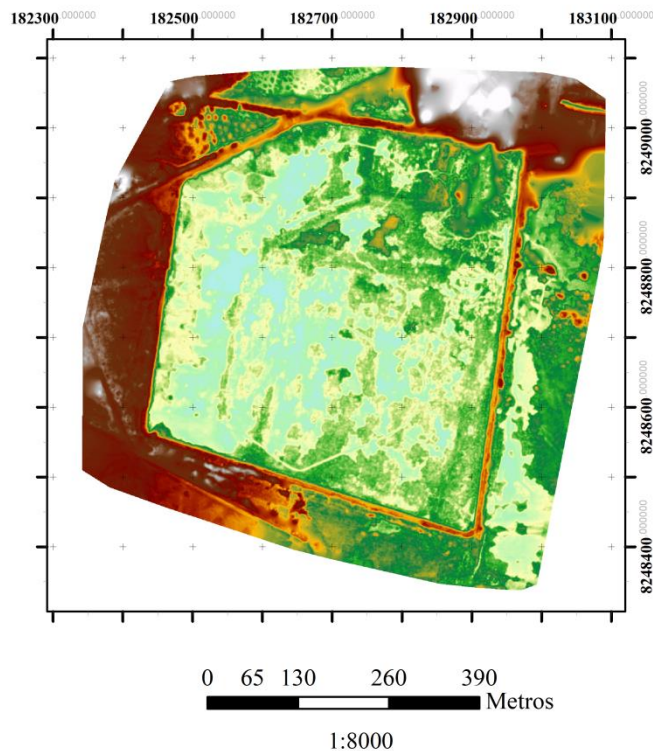
Legenda

Altimetria



Sistema de Coordenadas e DATUM:
Sirgas 2000 UTM Zona 23S

Figura 5.7- MDT referente ao Caso 2, quatro pontos de controle.



MDT 8 pontos de controle

Legenda

Altimetria



Sistema de Coordenadas e DATUM:
Sirgas 2000 UTM Zona 23S

Figura 5.8- MDT referente ao Caso 3, oito pontos de controle.

O Relatório de Qualidade, um dos produtos gerados pelo *Pix4D Mapper*, apresenta os valores de RMSE (*Root Mean Square Error*). Esse é o erro mais significativo disponibilizado no relatório, por levar em consideração a variância e o erro principal. A Tabela 5.2 é composta pelos valores desse erro em relação à altimetria (eixo z), para os pontos de controle e verificação.

Tabela 5.2 - RMSE para diferentes casos de pontos de controle.

RMSE (metros)		
Caso	Ponto de Controle (eixo Z)	Ponto de Verificação (eixo Z)
1	inexistente	18,411
2	0,015	1,327
3	0,025	0,082

A ausência de qualquer ponto de controle, situação do Caso 1, resulta em um produto insatisfatório e não condizente com a realidade altimétrica da área de estudo. O elevado valor do erro e a baixa qualidade do MDT são demonstrados na Figura 5.6.

A comparação visual dos Casos 2 e 3 leva a crer que houve aprimoramento no produto de 3 em relação a 2. A variação na paleta de cores da legenda indica maior discriminação das feições na área interna da estrutura da detenção, apontando para uma maior eficiência no Caso 3. O intervalo de valores menor para esse caso em relação ao Caso 2 permite inferir também maior adequação do modelo à realidade.

Entretanto, a Tabela 5.2 apresenta maiores erros em relação aos pontos de controle para o caso com maior quantidade de pontos de controle. Em relação aos pontos de verificação, contudo, o valor é inferior. Esse comportamento não condiz com o esperado, onde um maior número de pontos de controle garantiria um produto melhor e com menores erros. Foi levantada a possibilidade de que o comportamento do produto no Caso 2 provenha de um deslocamento espacial do ortomosaico para adequação aos pontos de controle, com maior inadequação aos pontos de verificação. A distribuição espacial dos marcos utilizados como pontos de controle e de verificação é também um fator que pode ter influenciado nesse resultado inesperado. Para análises seguintes neste estudo

considerou-se o MDT encontrado para o Caso 3, com oito pontos de controle, pela maior adequação aos pontos de verificação.

5.3 Comparação entre Modelos Digitais de Terreno

Conforme apresentado, a data de levantamento dos produtos em análise não é coincidente. Outro elemento que não é comum aos dois métodos são os pontos de controle e verificação utilizados nos processamentos dos modelos. Dessa forma, a validação dos dados torna-se ainda mais necessária pois a comparação entre dados planimetricamente divergentes (além de determinações normativas) tornaria o estudo inviável.

A Tabela 5.3 abaixo apresenta os valores para enquadramento em cada classe para a escala mínima da norma, 1:1000. As tabelas com valores limites a cada escala e classe estão todas disponíveis em norma (DSG, 2016).

Tabela 5.3 - Padrão de Exatidão Cartográfica para produtos digitais, planimetria e altimetria, conforme PEC-PCD (DSG, 2016).

Classe PEC	Classe PEC - PCD	Escala 1:1000			
		Planimetria		Altimetria	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,28	0,17	0,27	0,17
A	B	0,50	0,30	0,50	0,33
B	C	0,80	0,50	0,60	0,40
C	D	1,00	0,60	0,75	0,50

A validação planimétrica apresentou resultado de elevada acurácia, com enquadramento de 100% na Classe A em escala 1:1000 para os dois produtos, considerando como referência valores do GPS. A Tabela 5.4 apresenta as diferenças calculadas para a altura ortométrica. Para o GPS esses valores foram calculados por procedimento descrito anteriormente e para o LiDAR resulta de levantamento da empresa Topocart em 2016. Os padrões de enquadramento da norma, valores calculados e adequação desses estão também representados.

Tabela 5.4 - Validação altimétrica do levantamento LiDAR.

GPS				LIDAR MDT	
Ponto	X	Y	Z ortométrico	Z ortométrico	Δ Z ortométrico
pc1	182563,808	8248553,499	1079,237	1079,941	-0,7036
pc2	182557,126	8248687,889	1079,322	1079,979	-0,6574
pc3	182640,356	8248805,876	1079,199	1080,012	-0,8132
pc4	182740,577	8248843,701	1079,203	1080,108	-0,9047
pc5	182653,901	8248958,328	1078,813	1079,945	-1,1318
pc6	182798,549	8248953,642	1079,263	1080,150	-0,8873
pc7	182557,578	8248882,926	1079,418	1079,998	-0,5800
pc8	182935,038	8248825,268	1079,312	1080,317	-1,0049
pc9	182903,393	8248817,078	1079,265	1080,430	-1,1651
pc10	182937,339	8248736,766	1079,149	1080,120	-0,9708
pc11	182900,051	8248438,848	1079,290	1080,151	-0,8611
pc12	182836,357	8248481,419	1079,220	1080,019	-0,7989
base	182475,274	8248774	1079,558	1079,950	-0,3919
				Máximo	-0,3919
				Mínimo	-1,1651
				Média	-0,836
				DESVPAD	0,216904032
Escala	Egd (m)	Classe	PEC-PCD (m)	EP (m)	%
1:5000	2	D	1,5	1	100
1:10000	5	B	2,5	1,67	100

As primeiras comparações entre os MDTs de VANT e LiDAR resultaram em contrastes não só em locais com variação de cobertura (ausência e presença de vegetação) mas também para áreas de solo exposto ou de cobertura vegetal comum aos dois modelos. Em áreas vegetadas o comportamento é esperado pela variação natural do crescimento de acordo com o regime de chuvas. Para zonas de solo exposto, entretanto, onde foram encontrados os maiores contrastes, esse resultado não condiz com o esperado. A Tabela 5.5 abaixo ilustra esse comportamento.

Tabela 5.5 - Variações entre valores altimétricos (LiDAR - VANT) para mesma cobertura de solo.

SIRGAS 2000 UTM 23 S							
Solo exposto				Vegetação			
MDT	Leste (X)	Norte (Y)	Z ortométrico	MDT	Leste (X)	Norte (Y)	Z ortométrico
LIDAR	182612,8	8248677	1079,94	LIDAR	182774,7	8248933	1080,207
VANT	182612,8	8248677	1078,869	VANT	182774,7	8248933	1079,872
L-V	0,0003	1.00E-04	1,0713	L-V	0,0002	-0,0002	0,3346
LIDAR	182633,9	8248762	1079,94	LIDAR	182826,4	8248799	1080,436
VANT	182633,9	8248762	1078,723	VANT	182826,4	8248799	1080,258
L-V	0	1.00E-04	1,2171	L-V	0,0212	0	0,1778
LIDAR	182792,1	8248926	1080,016	LIDAR	182891,6	8248632	1080,173
VANT	182792,1	8248926	1079,177	VANT	182891,6	8248632	1080,004
L-V	0,0002	0,0003	0,8394	L-V	0,0105	-0,0014	0,1691

Tendo em vista o objetivo comparativo do estudo, os valores utilizados para processamento dos dados do voo VANT foram ajustados conforme procedimento a seguir:

- Identificação, dentre os 13 marcos alocados em campo, dos que não apresentam vegetação no levantamento LIDAR (observação do mosaico);
- Para esses pontos foi calculada a diferença em Z: LiDAR menos GPS;
- Obtenção da média dessa diferença;
- Adição dessa média aos valores de Z do GPS;
- Reprocessamento do VANT com esses novos valores de Z para pontos de controle e de validação.

Esse ajuste resultou na elevação de todo o modelo em 0,711 m após consideração da altimetria de 6 dos 13 marcos. Apesar de ainda existirem variações, principalmente em trecho de solo exposto, o ajuste tornou a análise comparativa possível.

A verificação de acurácia pelo *software* GeoPEC 3.5 foi então para verificação das adequações de planimetria e altimetria das coordenadas X, Y e Z, considerando cotas em Z adicionadas tanto aos dados obtidos em campo com o DGPS quanto aos dados de entrada dos pontos de controle e verificação utilizados no processamento de dados VANT.

A Tabela 5.6 se refere à validação altimétrica do VANT e está estruturada como a Tabela 5.4. A validação resultou em enquadramento de 100% na Classe A em escala 1:1000 para planimetria e altimetria.

Tabela 5.6 - Validação altimétrica do levantamento VANT.

GPS				VANT MDT	
Ponto	X	Y	Z ortométrico	Z ortométrico	Δ Z ortométrico
pc1	182563,808	8248553,499	1079,948	1079,986	-0,0380
pc2	182557,126	8248687,889	1080,033	1079,940	0,0931
pc3	182640,356	8248805,876	1079,910	1079,821	0,0886
pc4	182740,577	8248843,701	1079,914	1079,804	0,1094
pc5	182653,901	8248958,328	1079,524	1079,542	-0,0187
pc6	182798,549	8248953,642	1079,974	1080,050	-0,0759
pc7	182557,578	8248882,926	1080,129	1080,082	0,0468
pc8	182935,038	8248825,268	1080,023	1080,147	-0,1248
pc9	182903,393	8248817,078	1079,976	1080,173	-0,1972
pc10	182937,339	8248736,766	1079,860	1080,039	-0,1792
pc11	182900,051	8248438,848	1080,001	1079,995	0,0059
pc12	182836,357	8248481,419	1079,931	1079,915	0,0160
base	182475,274	8248774	1080,269	1080,345	-0,0760
				Máximo	0,1094
				Mínimo	-0,1972
				Média	-0,027
				DESVPAD	0,100602321
Escala	Eqd (m)	Classe	PEC-PCD (m)	EP (m)	%
1:1000	1	A	0,27	0,17	100

Para melhor visualização dos Modelos Digitais de Terreno obtidos pelas duas técnicas foi utilizado o *Arcscene* 10.3, com arquivos de nuvem de pontos em formato LAS. A entrada desses arquivos deve ser feita pela criação de um novo *LAS Dataset* em pasta de preferência do *ArcCatalog*. Nas propriedades de cada *LAS Dataset* é possível inserir os arquivos e determinar o sistema de coordenadas. Para visualização desejada optou-se pela apresentação de feição *Elevation*. Esses resultados podem ser observados nas Figuras 5.9 e 5.10 a seguir.

É importante ressaltar, quanto à presença e dimensões de vegetação, que o produto gerado com dados LiDAR data do primeiro semestre de 2016, enquanto o voo para obtenção de imagens VANT ocorreu no segundo semestre de 2018, no período de seca. Uma comparação entre as Figuras 5.9 e 5.10 evidencia o contraste dos dois métodos quanto à capacidade de obter dados de terreno em locais com vegetação mais densa, devido à grande densidade da nuvem de pontos obtida por LiDAR. A menor variação altimétrica encontrada na Figura 5.10 é esperada, uma vez que os dados serão majoritariamente da superfície real do solo. Não há dados históricos que permitam afirmar a existência das estradas internas no período da Figura 5.10, que apresentam-se evidentes na Figura 5.9.

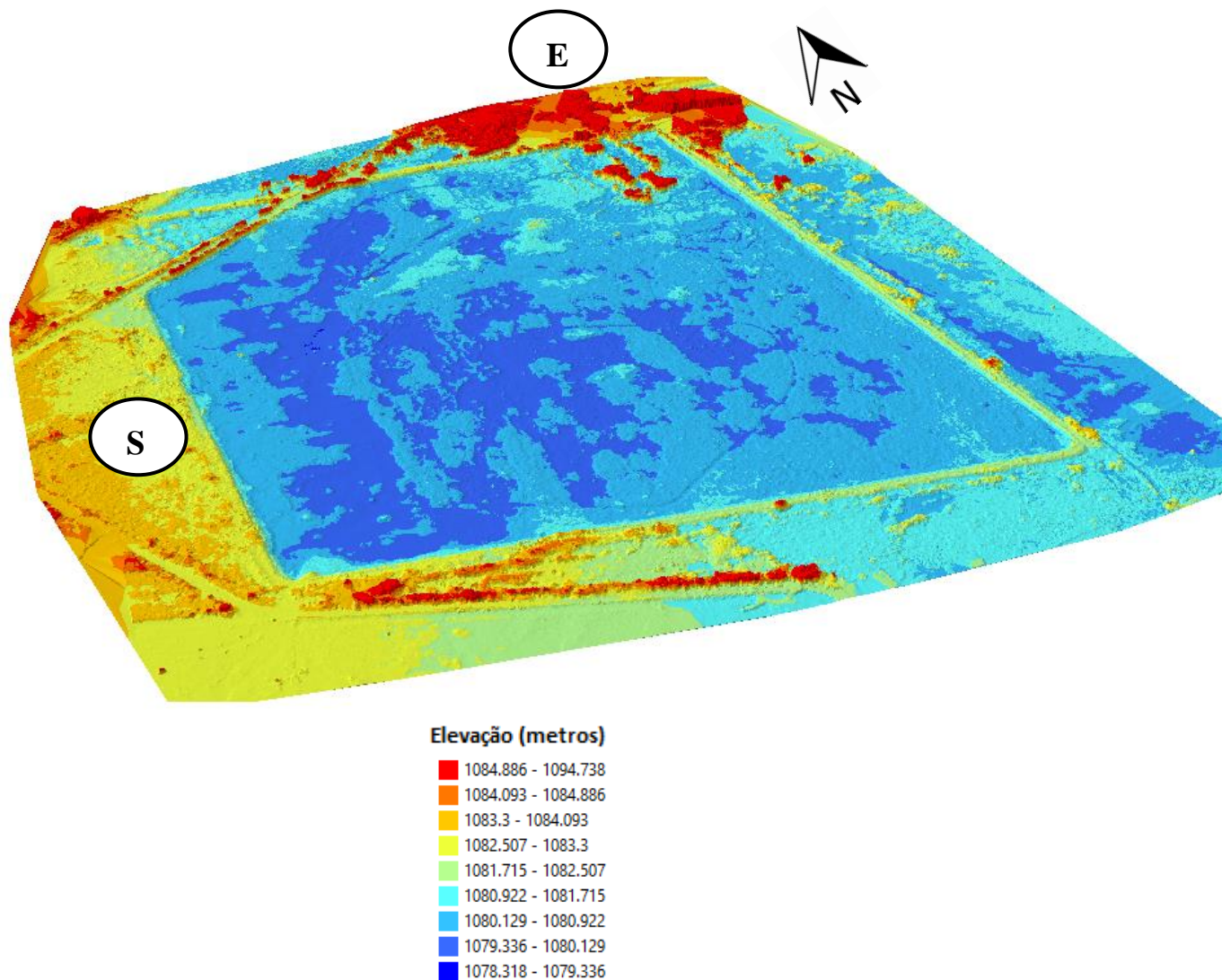


Figura 5.9- Visualização 3D do Modelo Digital de Terreno obtido com VANT (Caso 3).

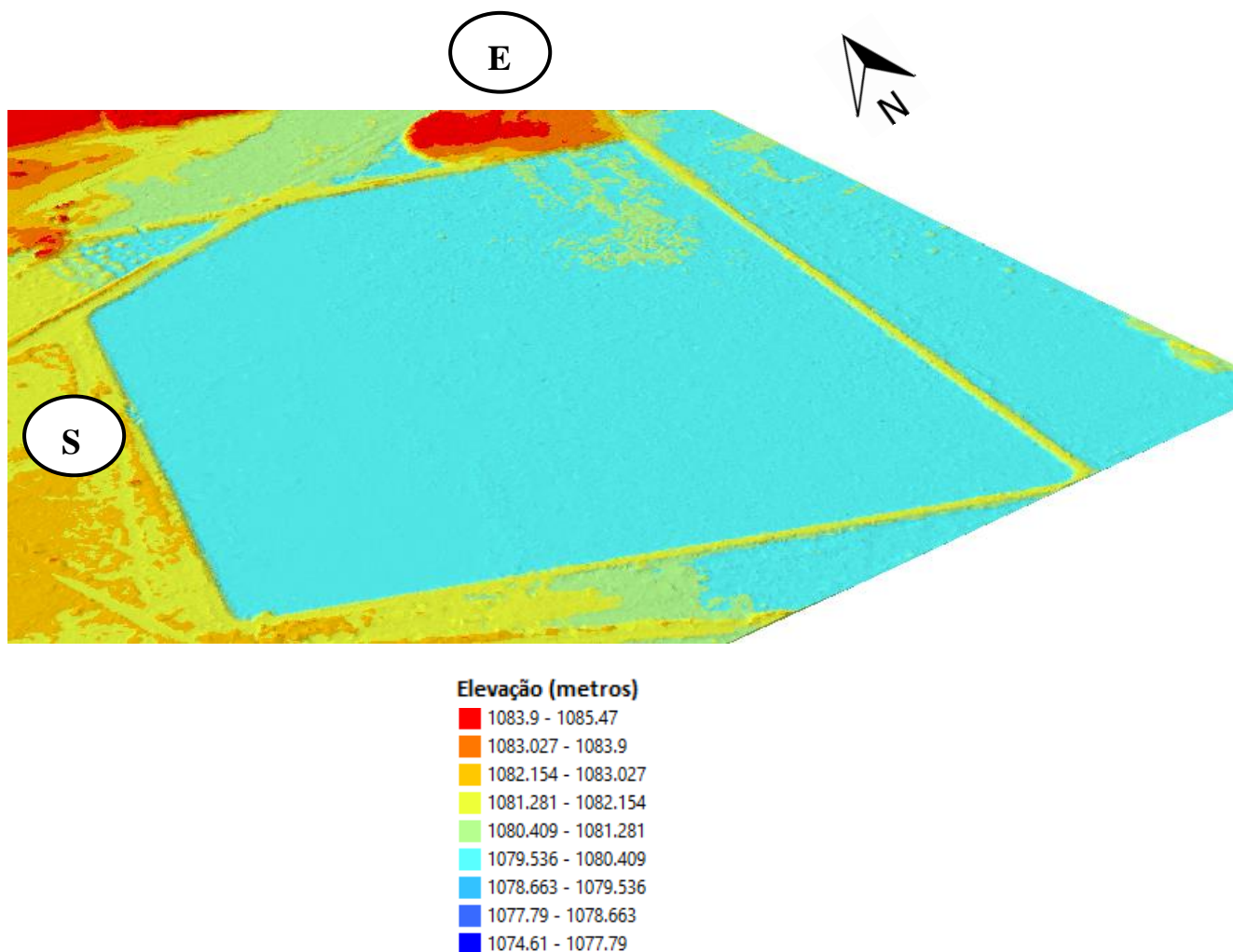


Figura 5.10 - Visualização 3D do Modelo Digital de Terreno obtido com LiDAR.

A comparação das discrepâncias dos valores em Z entre dois métodos, levando em consideração elevação do modelo VANT descrita anteriormente neste tópico, pode ser verificada na Figura 5.11. O MDT LiDAR foi subtraído do MDT VANT. Os valores negativos (em verde) incidem em zonas de solo exposto. Pela diferença temporal dos dois levantamentos algumas regiões que apresentam escavações/buracos para o VANT poderiam estar preenchidas por água no período posterior a chuvas do levantamento LiDAR. As demais variações decorrem da vegetação e suas variações de altura, uma vez que o MDT LiDAR passou por processo de classificação e filtragem pela equipe envolvida.

Diferença altimétrica entre MDT VANT e MDT LiDAR

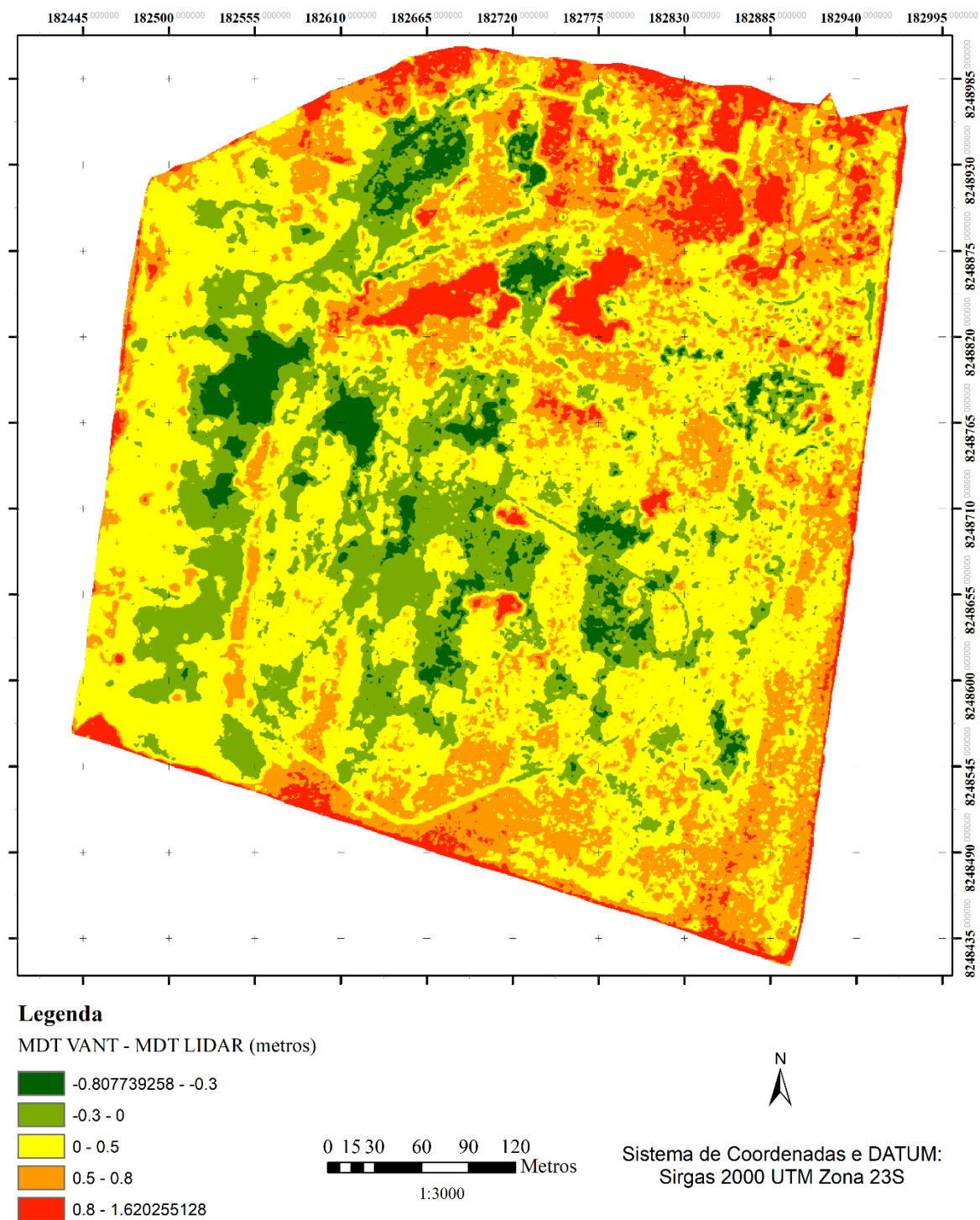


Figura 5.11 - Mapa da diferença altimétrica VANT - LIDAR.

Os dados dos perfis altimétricos gerados com a ferramenta *Stack Profile* estão apresentados nas Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15. para intervalo altimétrico de 0,05 m. Com objetivo comparativo os perfis obtidos em campo com o DGPS, com distanciamento de 30 m, estão plotados dos gráficos das Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15, assim como os eixos secundários correspondentes às diferenças entre os valores de altimetria entre VANT e LIDAR. É possível perceber que o padrão de comportamento dos dados é majoritariamente equivalente, com diferença dos valores de cota e intervalos. A variação nos dados VANT tem relação com a vegetação presente na bacia de detenção. O processamento com classificação automática não é capaz de identificar as diferenças entre solo e vegetação e, sem processo de filtração, esse resultado é esperado em locais com vegetação mais densa. As discrepâncias em regiões de solo exposto são explicitadas na representação gráfica. Os valores do VANT são acentuados para cotas máximas e mínimas. As hipóteses levantadas para esse comportamento nas cotas mais baixas são: generalizações do próprio *software* de processamento *Pix4D Mapper* e escavação do solo pela ação do fluxo de água pluviais no interior da estrutura.

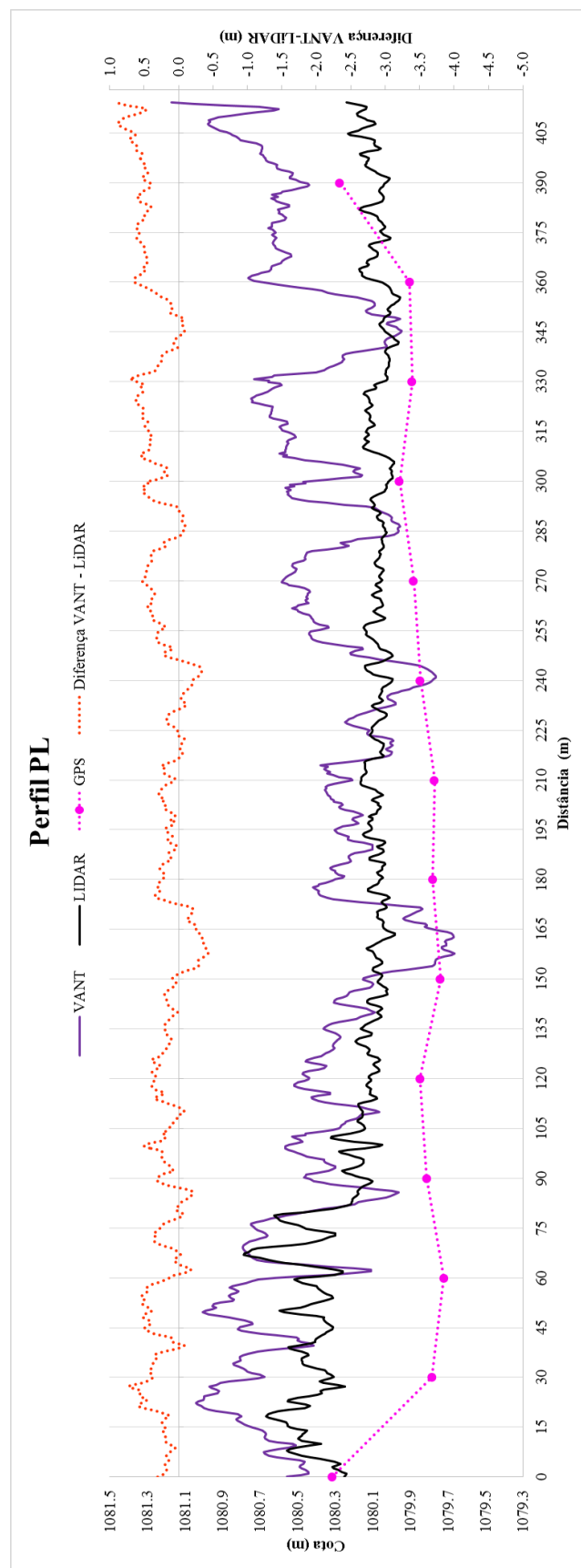


Figura 5.12 - Perfil de elevação PL.

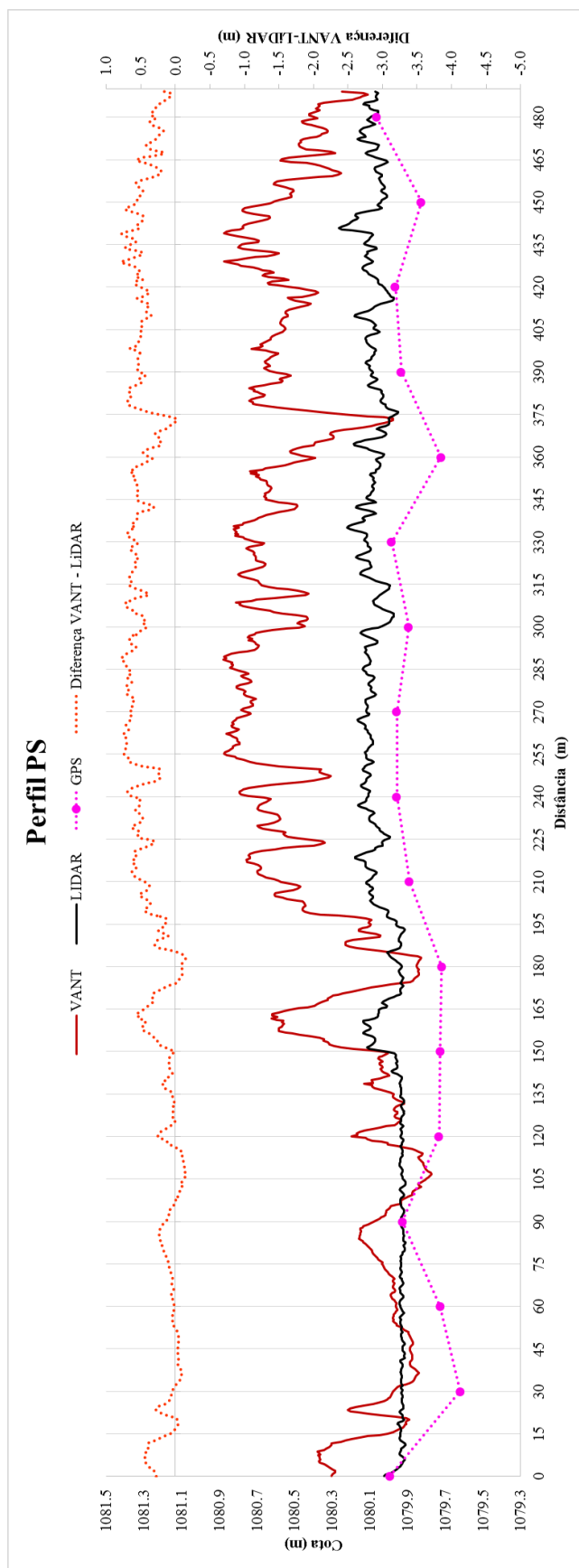


Figura 5.13 – Perfil de elevação PS.

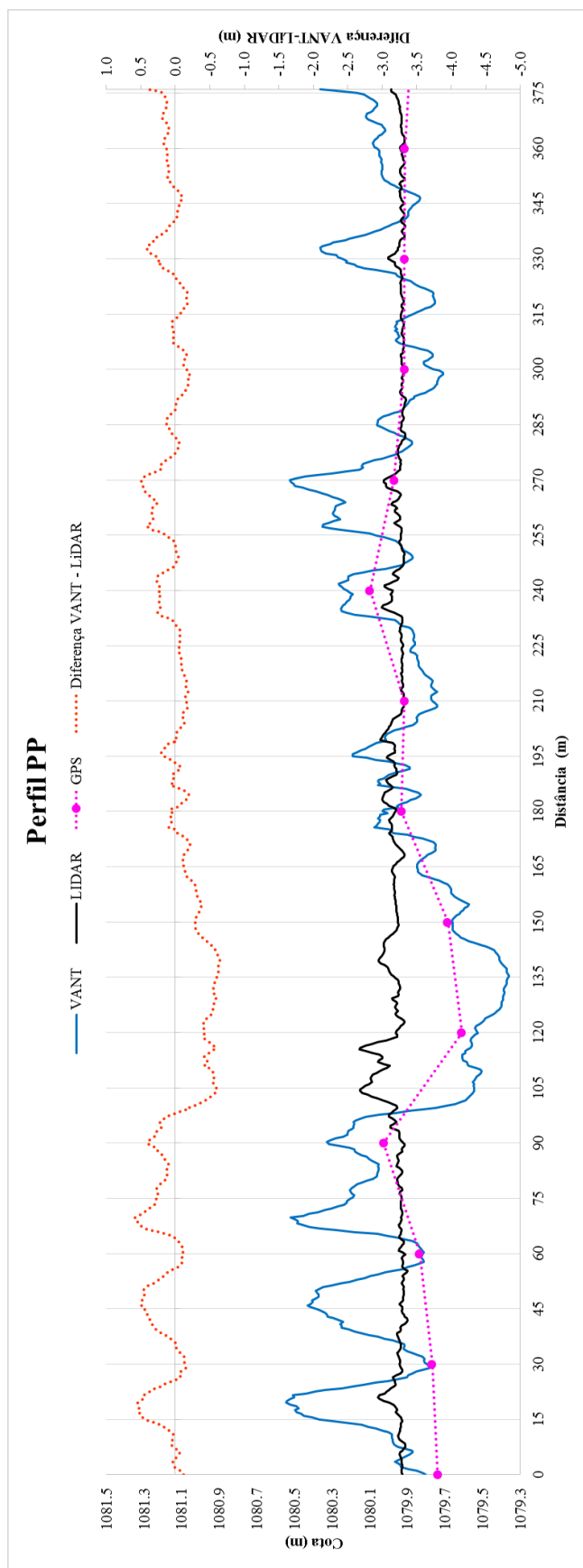


Figura 5.14 – Perfil de elevação PP.

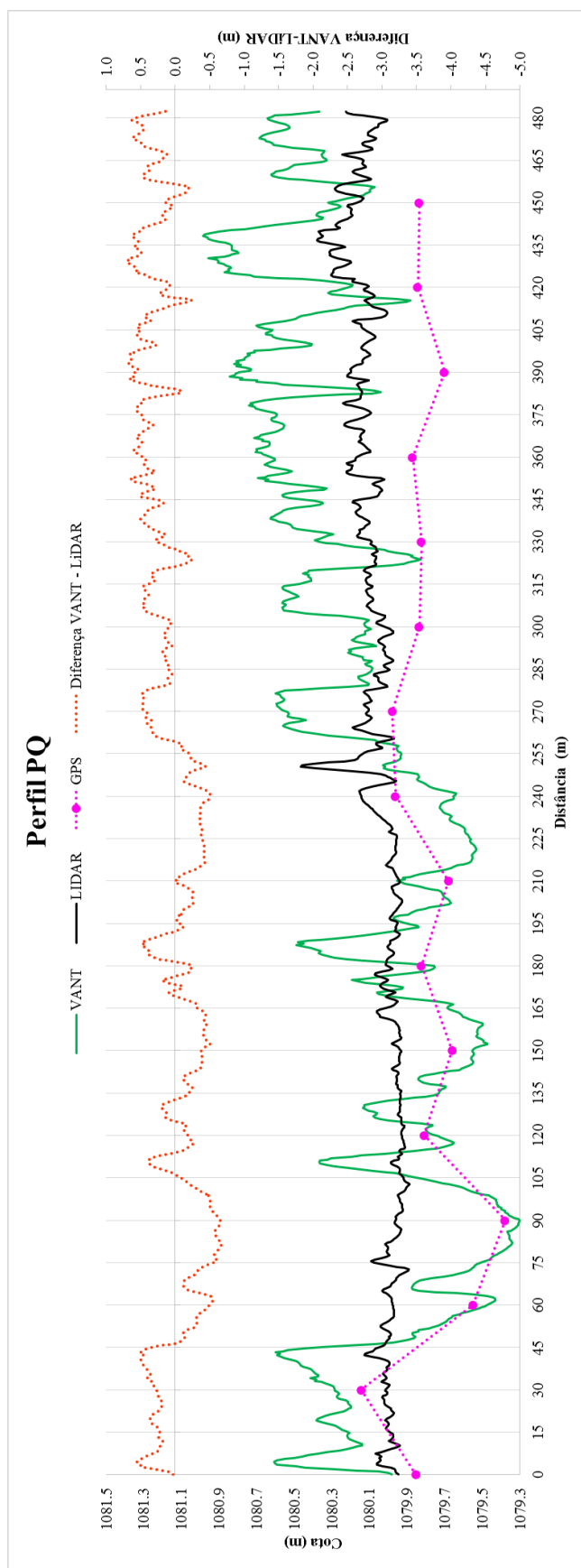


Figura 5.15– Perfil de elevação PQ.

5.4 Cálculo Cota x Área x Volume de sedimentos acumulados - VANT e LiDAR

Como mencionado, tendo em vista o objetivo comparativo dos métodos, a variação de 0,711m foi adicionada às cotas dos pontos de controle e verificação aplicados na geração dos dados VANT. As cotas iniciais, de fundo, consideradas para VANT e LiDAR foram respectivamente 1079,9824 (Cota VF) e 1079,9481 (Cota LF).

O volume total da bacia de retenção também foi considerado para determinação do percentual de ocupação por sedimentos e comportamento desses ao longo da área da estrutura. A cota mínima corresponde à Cota LF, localizada em área cimentada, exatamente em frente ao bueiro integrante da estrutura de descarga. A maior cota foi tomada a partir de valores de projeto, 1,5 m acima do ponto de cota mínima, e corresponde ao vertedouro com valor de 1081,448 m (Figura 5.16).



Figura 5.16 - Altura do vertedouro em relação à cota de fundo (mínima) da bacia de retenção (ArKis, 2005).

Os valores de área e volume totais estão apresentados na Tabela 5.7. A área foi obtida a partir do polígono utilizado para delimitação dos dois MDTs analisados, com objetivo de garantir uma análise comparativa dos resultados. O volume foi calculado a partir da multiplicação da área pela variação altimétrica entre as cotas mínima e máxima.

Tabela 5.7 - Dimensões da bacia de retenção.

Área (m ²)	Cota Mínima (m)	Cota Máxima (m)	Volume (m ³)
235442	1079,948	1081,448	353163

A partir dos valores de cota (a cada 0,01 m), área 2D e volume gerados pelo ArcGIS *Surface Volume Loop (MultiVolume)* foram criados gráficos de dispersão para representação das relações Cota x Área e Cota x Volume. Na Figura 5.17 podem ser observados os gráficos resultantes do procedimento, em relação à área. Os valores de área considerados para representação gráfica consistem na subtração da área a cada cota em relação à área total da região em estudo, apresentada na tabela 5.7. Dessa forma é possível visualizar, de forma acumulada, os acréscimos de área resultantes da presença de feições ou ruídos. A acentuação das curvas para cotas mais elevadas retrata o esse comportamento, onde as áreas ocupadas serão cada vez menores.



Figura 5.17 - Curva Cota x Área acumulada VANT e LiDAR.

O comportamento da curva em azul (VANT) para maiores valores de área para uma dada cota retrata constatações anteriores de que para regiões de solo exposto, apesar do acréscimo nos valores em Z dos dados GPS, o MDT ainda mostra valores baixos de cota para algumas regiões. A variação maior entre as curvas, encontrada para cotas correspondentes a volumes mais elevados, tem relação com a presença de árvores, que não permite que seja computado corretamente o nível de solo no levantamento por VANT.

Tendo a em vista compreensão da variação dos dados em relação ao volume de sedimentos foi determinado o Erro Percentual (ERRO1), tomando valores do LiDAR como base. A Equação 5.1 apresenta o procedimento de cálculo do ERRO1, onde são tomados apenas valores absolutos.

$$\text{ERRO1} = \left(\frac{|V_v - V_L|}{V_L} \right) \times 100$$

Equação 5.1 - Equação para cálculo do ERRO1.

O valor do ERRO 1 varia de 22,01% a 77,73% para as cotas máxima e mínima, respectivamente, comuns aos dois MDTs. (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 - Cálculo do ERRO 1.

Cota	VANT (V_v)	LIDAR (V_L)	ERRO1
m	Volume (m³)	Volume (m³)	(%)
1079.95	7325,21	630,87	77,73
1081.45	250712,79	321469,57	22,01

O gráfico da Figura 5.18 apresenta a distribuição volumétrica de VANT e LiDAR com relação ao volume total da bacia de detenção. A cota máxima da estrutura e de toda a análise é delimitada pela altura do vertedouro. A ferramenta do ArcGIS utilizada para determinação do volume retorna valores de volume acumulado de vazios. Essa ferramenta é comumente empregada em cálculo de batimetria, ou seja, leva em consideração o volume de água para cada cota. Desta forma, para cotas similares o volume apresentado

graficamente para VANT e LIDAR será inferior em relação à reta teórica que representa o reservatório, os espaços vazios teóricos estarão ocupados por sedimentos e vegetação.

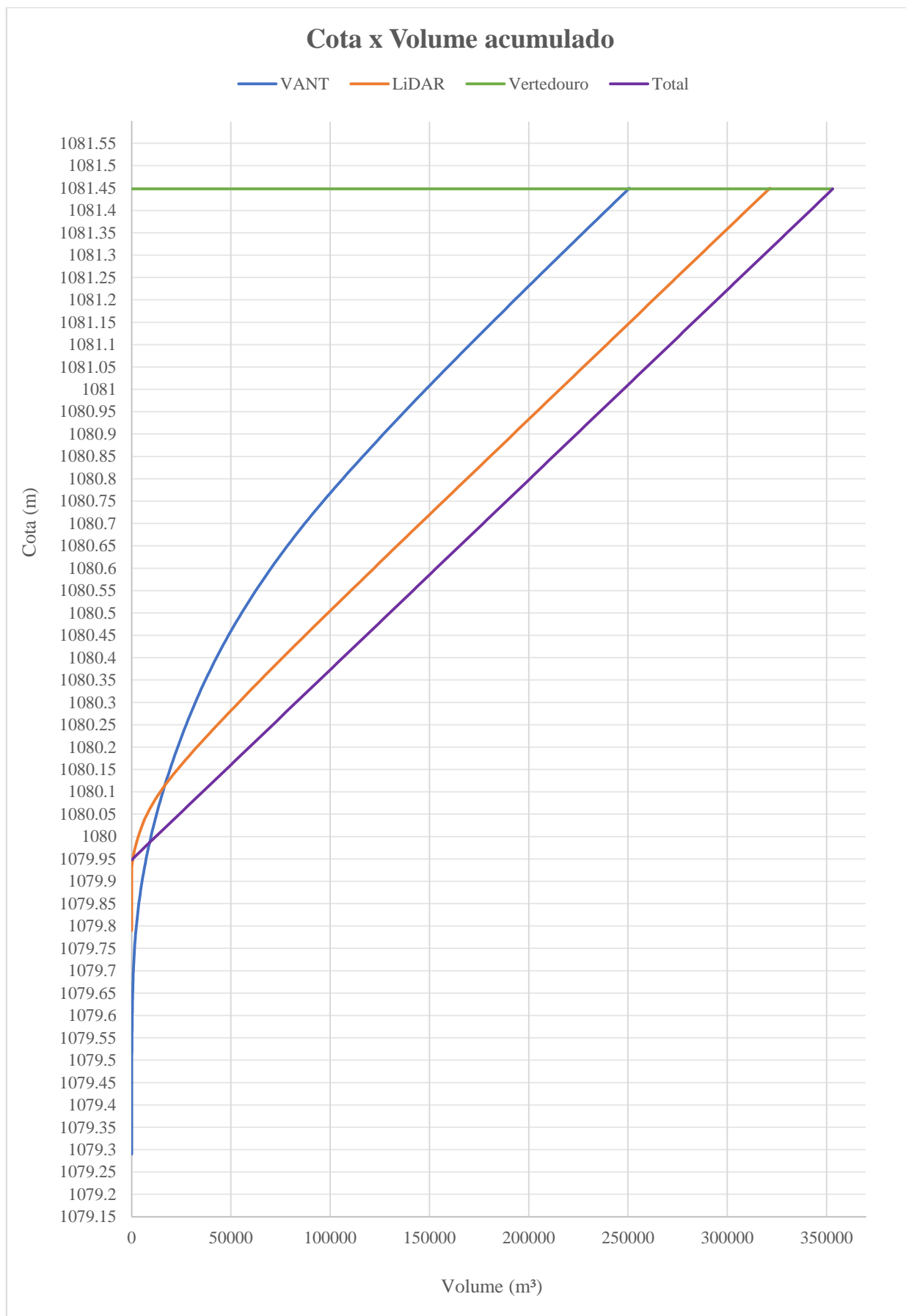


Figura 5.18 - Curva Cota x Volume acumulado VANT, LiDAR e Total.

O comportamento da curva correspondente ao VANT era esperado, uma vez que há presença de árvores de maior porte, que não são diferenciadas como tal na classificação automática de pontos. A impossibilidade de acesso à superfície do solo devido à vegetação torna os valores obtidos por VANT inadequados para variações discretas, em altimetrias de menor valor. A alocação dos dados LiDAR, pouco acima da reta extrapolada para o volume da bacia, condiz com as expectativas do estudo, pela presença de camada de sedimentos.

Em busca de uma melhor representação da distribuição do volume na estrutura de detenção foram considerados valores percentuais de ocupação. Os resultados estão apresentados de forma resumida na Tabela 5.9 para as cotas máximas e mínima da estrutura teórica. Os valores de “V%” são obtidos conforme a Equação 5.1 a seguir, tanto para valores de VANT quanto LiDAR.

$$Vv\%_c = \left(\frac{Vv_c}{Vr_{1081.448}} \right) \times 100$$

Equação 5.2 - Determinação do percentual do volume de sedimentos.

A diferença (\neq) é calculada pela subtração de percentuais entre o reservatório e cada método cota a cota. Seu valor pode ser atribuído ao percentual acumulado de sedimentos, vegetação e ruídos identificados nos modelos. Para o LiDAR esse acúmulo foi de 8,97%, enquanto para o VANT foram calculados 29,01% para a maior cota. A representação gráfica da Tabela 5.9 completa está disponível na seção de Anexos, Figura 7.3.

Tabela 5.9 - Cálculo de volume por cota em porcentagem.

Cota	Reservatório		LIDAR			VANT		
c (m)	Vr (m³)	Vr %	VI (m³)	VI %	≠ L (%)	Vv (m³)	Vv %	≠ V (%)
1079,95	0	0	630,87	0,18	-0,18	7325,21	2,07	-2,07
1079,96	2354,42	0,67	1038,44	0,29	0,37	7779,59	2,20	-1,54
1079,97	4708,84	1,33	1511,89	0,43	0,91	8249,23	2,34	-1,00
...
1081,44	350808,58	99,33	319121,03	90,36	8,97	248383,06	70,33	29,00
1081,45	353163,00	100,00	321469,57	91,03	8,97	250712,80	70,99	29,01

Como o presente estudo visa mensurar os sedimentos de fundo da estrutura, foi realizada operação com intenção de estimar quantitativamente o volume, em m³, de sedimentos, vegetação e inevitavelmente ruídos, correspondente a cada cota. Esses valores são identificados na forma de perda de volume. O procedimento é descrito a seguir:

- Foram considerados intervalos de cota superiores à cota máxima observada para VANT e LIDAR para determinação do volume dimensionado em regiões com certeza da ausência de qualquer vegetação.
- Tomou-se como referência a cota onde inicia variação da escala de grandeza entre cotas consecutivas, de 10⁻⁷ para 10⁻¹ (Figura 5.19).

1081.89	2348.68	-1.63966E-07
1081.88	2348.68	-1.63966E-07
1081.87	2348.680001	-8.63972E-07
1081.86	2348.68	1.89932E-07
1081.85	2348.68	0.00550865

Figura 5.19 - Identificação do ponto limite de volume ocupado na bacia de detenção, exemplo LiDAR.

- Os dados foram estruturados desta forma (Tabela 5.10), tomando como exemplo o cálculo de dados VANT. Os valores das colunas A, B e C resultam das operações com ArcGIS e o volume total (B) foi encontrado pelo procedimento supracitado (Figura 5.19). O valor de D é diferença entre a cota imediatamente superior da coluna C e sua inferior ($D = C_{n+1} - C_n$). Como resultado é obtido o volume por cota, já não acumulado para a camada, mas ainda com acúmulo de sedimentos, vegetação e potenciais ruídos. A coluna E opera da mesma forma, mas para as diferenças são utilizados valores de D ($E = D_{n+1} - D_n$). Desta forma é estimado o volume de vazios perdido, ou seja, o volume ocupado por algum elemento, interesse dessa análise.

Tabela 5.10 – Estruturação de dados para cálculo de perda de volume da bacia de detenção.

A	B	C	D	E
Cota	V total	V acumulado por cota	V por cota	Perda de volume
(m)	(m³)	(m³)	(m³)	(m³)
1082.47	489982.7	489982.7334 (C _{n+1})	2348.70576 (D _{n+1})	0.00088726
1082.46	489982.7	487634.0276 (C _n)	2348.704872 (D _n)	0.00022945
1082.45	489982.7	485285.3228	2348.704643	0.01014465
...
1080.69	489982.7	85464.17542	1780.927893	21.3303326
1080.68	489982.7	83683.24753	1759.597561	21.26653194
...
1079.3	489982.7	0.017835755	0.015152206	0.012468657
1079.29	489982.7	0.002683549	0.002683549	0.002683549
1079.28	489982.7	0	0	0

O gráfico de barras da Figura 7.4 em Anexos apresenta os valores de perda de volume. O eixo das abscissas contém valores e cota, enquanto o das ordenadas, e consequentemente as barras, está relacionado ao volume livre perdido. O gráfico em laranja equivale ao LiDAR e em azul está representação do VANT. É possível verificar o impacto da vegetação no espalhamento dos volumes identificados para o VANT, enquanto para o LiDAR os volumes concentram-se em um intervalo mais específico de cotas.

Para verificação da interferência dos valores de E na estrutura teórica os volumes de E foram acrescidos aos volumes teóricos dessa estrutura a cada cota. A adição dos valores estimados por cota não apresenta resultado visual representativo pela pequena variação. Portanto, optou-se pela apresentação das equações polinomiais de segunda ordem obtidas pelas linhas de tendência (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 - Equações polinomiais de ordem 2 - Teórica, VANT e LiDAR (sedimentos, vegetação e ruídos)

Teórica	$T = 3E-22x^2 + 4E-06x + 1079,9$	$R^2 = 1$
LiDAR	$L = -1E-12x^2 + 5E-06x + 1079,9$	$R^2 = 0,9968$
VANT	$V = -7E-12x^2 + 7E-06x + 1079,7$	$R^2 = 0,9526$

A Tabela 5.12 apresenta o cálculo do erro relativo entre as duas técnicas e o volume teórico para a bacia.

Tabela 5.12 - Cálculo do ERRO 2.

VANT	LIDAR	Bacia de detenção	ERRO 2
VV (m³)	VL (m³)	VT (m³)	$ VV - VL / VT$
250712.79	321469.574	353163	2.20832E-06

Foram geradas também as curvas de nível para os dois modelos em análise através da ferramenta *Contour* do ArcGIS (*Spatial Analyst Tools > Surface > Contour*). As Figura 7.1 e 7.2 dos Anexos apresentam os mapas correspondentes aos produtos VANT (equidistância de 50cm) e LiDAR (equidistância de 30 cm) respectivamente. Para todos os mapas foi considerado o mesmo recorte do interior da área em estudo. Os mapas possibilitam observar discrepâncias e convergências no comportamento das curvas entre os dois modelos devido a feições não filtradas. Em regiões de solo expostos os resultados se assemelham e a influência da vegetação no modelo VANT é evidenciada. Regiões de coloração avermelhada indicam presença de vegetação arbórea. Uma análise detalhada do arquivo via ArcGIS possibilita também maior compreensão do comportamento dos sedimentos na bacia de detenção.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

No que tange aos procedimentos de correção de dados obtidos com o GPS Trimble R8s, a utilização de base RBMC mostrou-se fundamental para garantia da validade e conformidade das coordenadas coletadas em campo. A correção de altitude ortométrica apontou para variações de 12,32 a 12,46 (base RBMC) em relação a valores de coordenadas geométricas. Para casos de grande exigência de precisão altimétrica essa adequação deve ser a base para que os dados sejam aplicados nas demais fases do estudo.

O uso de fotogrametria aérea por VANT resultou em análises importantes e ressalvas. O emprego de pontos de controle (GCP) e pontos de verificação (CP) em três casos, em relação ao número de pontos de controle, revelou variações drásticas nos resultados dos Modelos Digitais de Terreno. A ausência de pontos de controle foi

considerada inadequada para obtenção desse tipo de produto. A análise dos erros (RMSE) apresentou resultado inesperado com maior adequação ao caso com menor número de GCPs, entretanto, em relação aos pontos de verificação, o valor de RMSE é inferior. Foi levantada a possibilidade de que a maior acurácia do Caso 2 provenha de um deslocamento espacial do ortomosaico para adequação aos GCPs gerando, portanto, inadequação aos CPs.

A avaliação dos produtos finais, por meio das curvas Cota x Área e Cota x Volume, evidencia a interferência da vegetação presente no interior da bacia de retenção para geração do MDT. A classificação automática da nuvem de pontos não é capaz de identificar as diferenças entre solo e vegetação. A questão da vegetação é destaque também no cálculo dos volumes totais e por cota em cada método. O MDT alcançado pelo LiDAR representa o comportamento do sedimento na estrutura de drenagem. O procedimento por VANT é capaz de representar as variações da forma física, entretanto, para as exigências matemáticas e submétricas de um estudo topográfico, são necessários processos de filtragem e classificação mais específicos e detalhados que considerem as alturas das tipologias de vegetação presentes na área. Caso esses processos não sejam empregados, o presente estudo aponta inadequação à aplicação do levantamento por VANT para áreas de vegetação densa, como propriedades rurais. Recomenda-se a aplicação do método para produção de topografia de alta precisão em regiões de feições predominante urbanas.

A variação temporal entre os dados tanto em relação à diferença de dois anos quanto em relação ao período de chuvas da região não é ideal.

O percentual acumulado de sedimentos, vegetação e ruídos identificados nos modelos foi de 8,97% para o LiDAR, enquanto para o VANT foram calculados 29,01%. Esse percentual corresponde à perda de volume disponível na bacia de retenção.

O volume livre total em relação à cota do vertedouro (1081,45) foi de 250712,79 m³ para o VANT e 321469,57 m³ para o LiDAR. O volume teórico da bacia de retenção é de 353163 m³. Esses valores condizem com os percentuais de perda de volume supracitados.

A ocupação de 8,97% encontrada com o LiDAR após 11 anos de operação é considerada baixa e indica que a estrutura de retenção está superdimensionada para o volume de águas pluviais que tem recebido. Esse dado indica para a possibilidade de

expansão da região drenada que abastece a bacia de detenção, para que essa receba um volume maior de água e, conseqüentemente, sedimentos, como é capaz de comportar.

6.2 Recomendações

Em relação à sinalização dos marcos, as placas de metal não consistiam em material galvanizado e foi observada ferrugem após certo tempo da instalação. O recobrimento do papel quadriculado em plástico autoadesivo também não apresentou resultado ideal por causar reflexão em algumas imagens. Recomenda-se atenção ao material da estrutura, caso haja necessidade de uma maior durabilidade, e busca por cobertura transparente e sem brilho.

Recomenda-se a fixação da configuração do balanço de branco (WB) da câmera do VANT, para que os ajustes automáticos não resultem em alterações na coloração das ortofotos como ocorrido.

Para compreensão da evolução temporal dos processos de perda de volume por acúmulo de sedimentos no interior da bacia de detenção recomenda-se a realização de novo estudo com aplicação dos métodos apresentados no neste trabalho. Um intervalo anual pode contribuir para comprovação ou refutação das hipóteses levantadas, além de permitir uma quantificação de volume de sedimentos nesse período. O emprego de câmeras com capacidade NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é também recomendada, uma vez que permite uma melhor identificação da vegetação e consequentemente diferenciação em relação ao solo exposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADASA - AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. (2011). Resolução nº9, de 8 de Abril de 2011. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos de domínio do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e Estados. *Diário Oficial do Distrito Federal de 11.04.2011*, Seção 1, p.18, p. 9, 2011.
- ALVES JÚNIOR, L. R.; CÔRTEZ, J. B. R.; FERREIRA, M. E.; e SILVA, J. R. (2015). "Validação de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT." *XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, p. 2157–2164.
- ANAC. (2017). Agência Nacional de Aviação Civil. Orientações para Usuários de Drones. 1ª edição.
- ArKIS Infraestrutura Urbana Ltda. (2005). "Projeto de avaliação ambiental e estudo de dissipação dos pontos de lançamentos da galeria do Cruzeiro – Guará – Distrito Federal." Brasília, DF, 56p.
- CADORIN, D. A.; MELLO, N. A. De. (2011) "Efeitos da Impermeabilização dos solos sobre a arborização no município de Pato Branco - PR." *Synergismus Scientifica*, [s. l.], v. 6, p. 8.
- CAMPANA, N.; TUCCI, C. E. M. (2001). "Predicting floods from urban development scenarios: Case study of the Dilúvio basin, Porto Alegre, Brazil." In: *Urban Water, Oxford* Vol. 3n.2(2001) p.113-124. (s)
- CAMPANA, N. A.; BERNARDES, R. S.; SILVA JR., J. A. (2007). "Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbano com bacias de retenção." *Amby-Água*, Taubaté, v. 2, n. 3, p. 98-111.
- CIRIA. (2018). The SuDS Manual. Disponível em: <[http://www.hrwallingford.com.cn/pdfs/news/CIRIA report C753 The SuDS Manual-v2.pdf](http://www.hrwallingford.com.cn/pdfs/news/CIRIA%20report%20C753%20The%20SuDS%20Manual-v2.pdf)>. Acesso em: 6 mai. 2018.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (1998). "Drenagem urbana e Controle de Erosão." VI Simpósio nacional de controle da erosão. 29/3 a 1/4 1998, Presidente Prudente, São Paulo.

- COSTA, G. C.; E SILVA, D. C. Da. (2012). "Pré-Sinalização de pontos de apoio." IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias Da Geoinformação, p. 1–9.
- DA SILVA, C. A.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; SANTOS, A. L. S. Dos; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. (2016). "Avaliação da Acurácia do Cálculo de Volume de Pilhas de Rejeito Utilizando VANT, GNSS E LiDAR/Evaluating the accuracy in volume calculation in a pile of waste using UAV, GNSS and LiDAR." *Boletim de Ciências Geodésicas*, **22**(1), 73–94.
- DE PAULA, A. C. V. (2018). *Comportamento e Evolução Temporal de Bacias de Detenção e Retenção no Amortecimento de Cheias e na Qualidade da Água – Estudo de Caso da Bacia de Detenção do Guará - DF*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 45p.
- DSG. Diretoria de Serviço Geográfico. (2016). *Norma da especificação técnica aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre* (ET- ADGV DEFESA F Ter). Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Departamento de Ciência e Tecnologia. Brasília – DF, 2ª edição, 2016.
- DRONEENG. (2018). Planejamento de voo: tudo o que você precisa saber. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo/>. Acesso em: 12 mai. 2018.
- EISENBEISS, H. (2004). "A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition." *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. **36**, n. 5/W1, 2004. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W1/papers/11.pdf>
- CHUERUBIM, M.L. (2013). "Utilização do software mapgeo 2010 como recurso didático no estudo de superfícies e referenciais geodésicos adotados em geodésia." *Rev. Geogr. Acadêmica*, 7 (2), p. 31–47.
- FÄRM, C. (2002). "Evaluation of the accumulation of sediment and heavy metals in a storm-water detention pond." *Water Science and Technology*, v. **45**, n. 7, 105–112.
- FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L. R.; MAROTTA, G. S.; MENESES, P. H. B. J. (2013). "Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial." *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, **16**, 9308–9315. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W1/papers/11.pdf> Acesso em: 20 jul. 2018.

- FERRIGO, S.; TAVORA, B. E.; MINOTI, R. T.; LIMA, J. E. F. W.; KOIDE, S. (2014).
 “Avaliação De Possíveis Impactos Das Mudanças Climáticas E Do Uso Do Solo Sobre a
 Produção De Sedimentos Em Bacia Hidrográfica No Distrito Federal.” *Encontro Nacional
 de Engenharia de Sedimentos*, [s. l.], v. XI, p. 15.
- FIGUEIRA, N. M.; OLIVEIRA, L. C. De. (2013). "Super-Resolução : Técnicas Existentes E
 Possibilidade De Emprego Às Imagens Do Vant Vt-15." *Revista Militar de Ciência e
 Tecnologia*, v. **30**, 3–19. Disponível em:
 <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_2_tri_2013/RMCT_095_D_12.pdf>
- FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; HUNT, W. F.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; ARTHUR, S.;
 TROWSDALE, S.; BARRAUD, S.; SEMADENI, D. A.; BERTRAND-KRAJEWSKI,
 J.L.; MIKKELSEN, P.S.; RIVARD, G.; UHL, M.; DAGENAIS, D.; VIKLANDER, M.
 (2015). "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of
 terminology surrounding urban drainage." *Urban Water Journal*, **12**(7), 525–542.
- GEOPORTAL (SEGETH) (2018). Disponível em:
 <<https://www.geoportal.segeth.df.gov.br/mapa/>>. Acesso em: 12 mai. 2018.
- GeoPEC. (2019). Software para avaliação da acurácia posicional em dados cartográficos.
 Disponível em:<[http://www.geopec.com.br/2008/12/software-geopec-processamento-do-
 padro.html](http://www.geopec.com.br/2008/12/software-geopec-processamento-do-padro.html)> Acesso em: 02 jan. 2019.
- GILI, J. A.; COROMINAS, J.; RIUS, J. (2000). “Using Global Positioning System techniques in
 landslide monitoring.” *Engineering Geology*, [s. l.], v. **55**, n. 3, p. 167–192.
- GOMES, C.I.D. (2015) Avaliação da qualidade de águas pluviais lançadas por bacias de
 retenção em corpos hídricos do Distrito Federal, DF – BRASIL. *XXI Simpósio Brasileiro
 de Recursos Hídricos* [s. l.], [s.d.].
- GOMES, V. M. (2004). *Aspectos qualitativos e quantitativos da água de drenagem pluvial em
 sub-bacia urbana na cidade de Brasília -DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia
 Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental,
 Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p.
- GDF - Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras, (2009). Plano Diretor de
 Drenagem Urbana do Distrito Federal. Volume 5. Brasília.
- IBGE. (2009). Posicionamento Preciso por Ponto (PPP). Disponível em:
 <www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>. Acesso em: 30 agosto 2018.

- IBGE. (2018) Modelo de Ondulação Geoidal. Disponível em:
ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm>. Acesso em: 10 novembro 2018.
- IBGE. (2018). Panorama do Distrito Federal Disponível em:
<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/panorama>> Acesso em: 20 jun. 2018.
- IBGE. (2018). Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS. Disponível em:
ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>. Acesso em: 10 novembro 2018.
- INCRA. (2013). “Manual Técnico de Posicionamento: Georreferenciamento de Imóveis Rurais.” *Manual Técnico de Posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais*, **37**.
- JACOBS, P. G. (2005). ASSESSING RTK GPS FOR A SUBURBAN SURVEY PRACTICE
 Dissertação de Mestrado, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, Queensland, 76p.
- LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O.; MENESES, P. R.; ROSA, J. W. C.; ROIG, H. L. (2005). “Aplicação de Geotecnologias em correlações entre solos, geomorfologia, geologia e vegetação nativa no Distrito Federal, DF.” *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, [s. l.], p. 2211–2218.
- LIU, X.; ZHANG, Z. (2007). “The effect of LiDAR data density on DEM accuracy.” *International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM07)*, [s. L.].
- FIGUEIREDO E.O.; FIGUEIREDO, S. M. de M, (2018). Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3. Circular Técnica 75. Rio Branco, AC, 56p.
- MATIAS, G. R. D. M.; GUZATTO, M. P.; SILVEIRA, P. G. (2015). *Mapeamento Topográfico Cadastral Por Integração De Imagens Adquiridas Com Vant a Técnicas Tradicionais*. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul , Instituto de Geociências, Rio Grande do Sul, RS , 175p.
- NEBIKER, S.; ANNEN, A.; SCHERRER, M.; OESSCH, D. (2008). "A light-weight multispectral sensor for micro uav – opportunities for very high resolution airborne remote sensing." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XXXVII**(B1), 193–1200. Disponível em:
http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/204.pdf>

- NEUMANN, E.; FAJARDO, S.; E MARIN, M. Z. (2017). "The recent transformation in Brazil's rural space: state paper analysis in rural development policies of decades of 1970 a 1990/As transformações recentes no espaço Rural brasileiro: análises do papel do estado nas políticas de desenvolvimento rural das d. Ra'e Ga, 40.
- NEUMANN, E.; FAJARDO, S.; MARIN, M. Z. (2017). "As transformações recentes no espaço rural brasileiro: análises do papel do estado nas políticas de desenvolvimento rural das décadas de 1970 a 1990." *RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise*, [s. l.], v. **40**, p. 177–194.
- NGA Office of Geomatics (2018). Disponível em: <http://earth-info.nga.mil/GandG/coordsys/grids/utm_1km_polyline_dloads.html#Downloading> Acesso em: 12 mai. 2018.
- NOVACAP (2018). Nota sobre as bacias de detenção do DF. Disponível em: <<http://www1.novacap.df.gov.br/nota-sobre-as-bacias-de-detencao-do-df/>> Acesso em: 14 abr. 2018.
- NUNES, J. F.; ROIG, H. L. (2015). "Análise e mapeamento do uso e ocupação do solo da Bacia do Alto do Descoberto, DF/GO, por meio de classificação automática baseada em regras e lógica nebulosa." *Revista árvore*, **39**(1), 25–36. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/html/488/48838420003/>>
- PACHECO, A. da P.; CENTENO, J. A. S.; ASSUNÇÃO, M. G. T. De; BOTELHO, M. F. (2011). "Classificação de pontos LIDAR para a geração do MDT." *Boletim de Ciencias Geodesicas*, **17**(3), 417–438.
- Pix4D. (2018). Manual. Disponível em: <support.pix4d.com/hc/en-us/sections/200591059-Manual>. Acesso em: 15 agosto 2018.
- POLEZEL, W. G. C. (2010). Investigações sobre o impacto da modernização do GNSS no posicionamento. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Presidente Prudente, SP, 106p.
- RIGHETTO, A.M.(coord) (2009) Manejo de águas pluviais urbanas. Rio de Janeiro: ABES. 396 p. Disponível em: <https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_4.pdf>. Acesso em: 6 mai. 2018.
- ROIG, H. L.; FERREIRA, A. M. R.; MENEZES, P. H. B. J.; MAROTTA, G. S. (2013). "Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte de

- sedimentos no Lago Paranoá." *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, 9332–9339, Foz do Iguaçu, Brasil.
- SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, M. C. B. (2018). "Cartografia geral, digital e temática." *Série Geotecnologias: Teoria e prática*, Universidade Federal do Paraná, 1, p. 210.
- SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G.; BEZERRA, H. S. Da (2009). "Mapeamento da cobertura vegetal natural e antrópica do bioma Cerrado por meio de imagens Landsat ETM+." *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento remoto*, [s. l.], n. INPE, p. 1199–1206.
- SANTOS, A. Dos; AMARO, V.; SANTOS, M. (2014). "Terrestrial Laser Scanner Applied to Monitoring Beach Morphological Changes In A High Energy Coastal Zone In Northeast Brazil." [s. l.], n. June, 2014.
- SCHLODERER, G.; BINGHAM, M.; AWANGE, J. L.; FLEMING, K. M. (2011). "Application of GNSS-RTK derived topographical maps for rapid environmental monitoring: A case study of Jack Finnelly Lake (Perth, Australia)." *Environmental Monitoring and Assessment*, [s. l.], v. 180, n. 1–4, p. 147–161.
- SILVA, C. A.; DUARTE, C. R.; DOS SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. (2016). Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. *Boletim de Ciências Geodésicas*, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 73–94.
- SILVA, C. A.; SOUTO, M. V. S.; DUARTE, C. R.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. (2015). Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados pelo MVANT / DNPM. *Revista Brasileira de Cartografia A*, 7(1808–0936), p. 1479–1495.
- SNYDER, D. T.; HALUSKA, T. L.; RESPINI-IRWIN, D. (2013). "The Shoreline Management Tool—An ArcMap tool for analyzing water depth, inundated area, volume, and selected habitats, with an example for the lower Wood River Valley, Oregon: U.S." *Geological Survey Open-File Report 2012–1247*, 86 p. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/of/2012/1247/>> Acesso em: 02 jan.2019.
- TOPOCART (2017). Mapeamento aerofotogramétrico das áreas urbanas do Distrito Federal. Produto 2 - Área 1. Ortofotos Digitais e Perfilamento Laser. Brasília, DF, 91p.
- TRIMBLE (2016). Trimble R8s GNSS System. Datasheet. Disponível em: <<http://www.trimble.com/survey/trimble-r8s.aspx>> Acesso em: 10 jun. 2018.

- TRIMBLE. Trimble Business Center: Tutorials. Disponível em:
<geospatial.trimble.com/trimble-business-center-tutorials>. Acesso em: 01 agosto 2018.
- TUCCI, C. E. M. (1997). "Água no meio urbano." *Livro água Doce*, 1-40.
- TUCCI, C. E. M. (2003). "Inundações urbanas na América do Sul." Ed. dos Autores. 45-150.
- URBONAS, B. (1994). "ASSESSMENT OF STORMWATER BMPs AND THEIR TECHNOLOGY." *Water Science and Technology*, **v. 29**, n. 1-2, 347-353.
- USGS (2018). U.S. Geological Survey. The Water Cycle - USGS Water Science School.
Disponível em: <<http://water.usgs.gov/edu/watercyclerrunoff.html>>. Acesso em: 10 mar. 2018.
- VILLASENOR, J. (2012). *What Is a Drone, Anyway?* Disponível em:
<https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/what-is-a-drone-anyway/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- WUTKE, J. D.; CENTENO, J. A. S. (2007). "Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a LASER." *Boletim de Ciências Geodésicas*, **v. 13**, p. 151-164.
- YOUSEF, Y. A.; HVITVED-JACOBSEN, T.; SLOAT, J.; LINDEMAN, W. (1994).
"Sediment accumulation in detention or retention ponds." *Science of the total environment*, **v. 146**, 451-456.
- ZANETTI, J.; DE PAULA, R.M.; DOS SANTOS, A. MEDEIROS, N. G. (2016). Avaliação da acurácia posicional planimétrica de ortoimagens disponibilizadas nos sistemas de informações geográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, **68/7**: 1341-1352.

7 ANEXOS

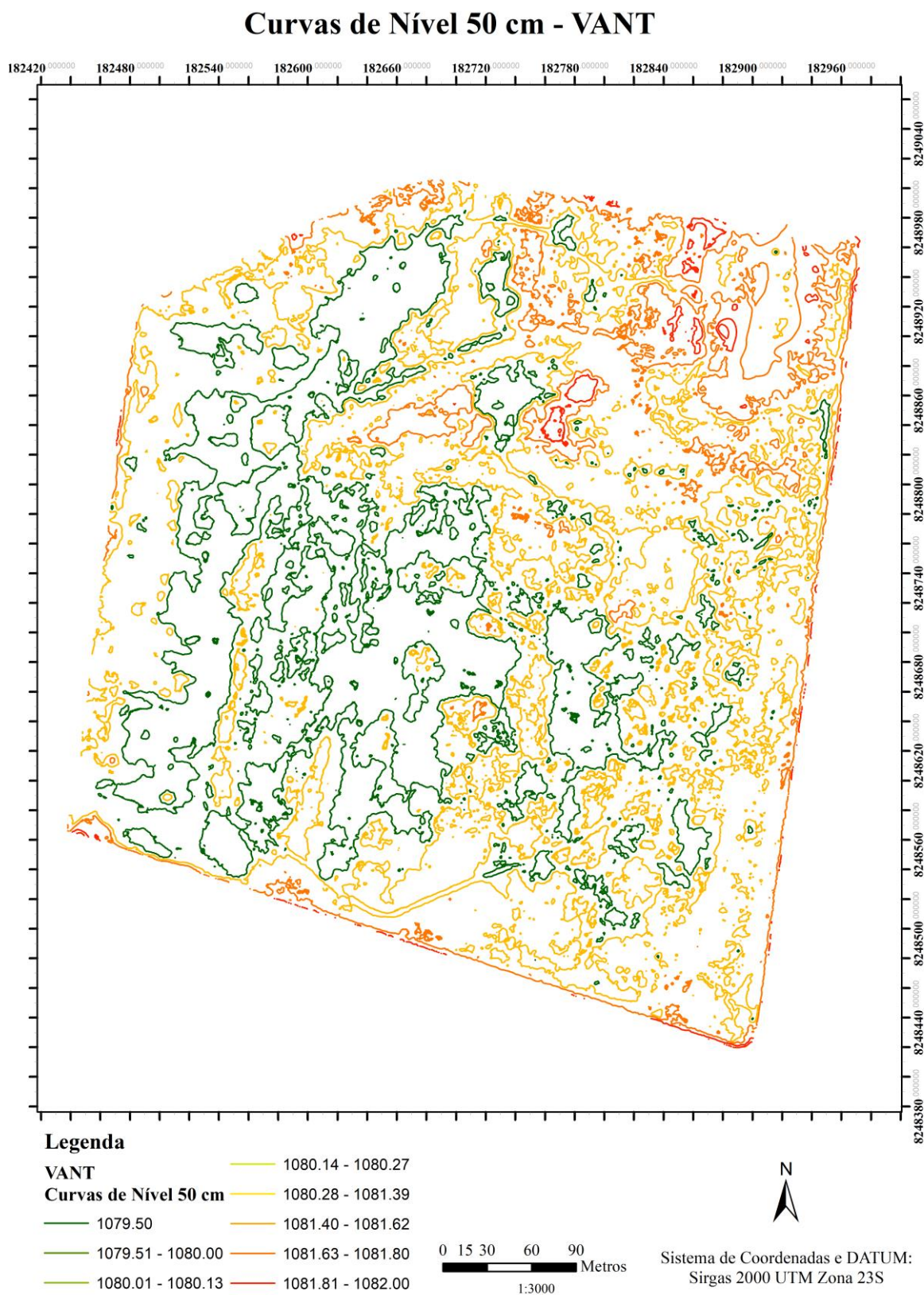


Figura 7.1 - Curvas de Nível 50 cm -VANT.

Curvas de Nível 30 cm - LIDAR

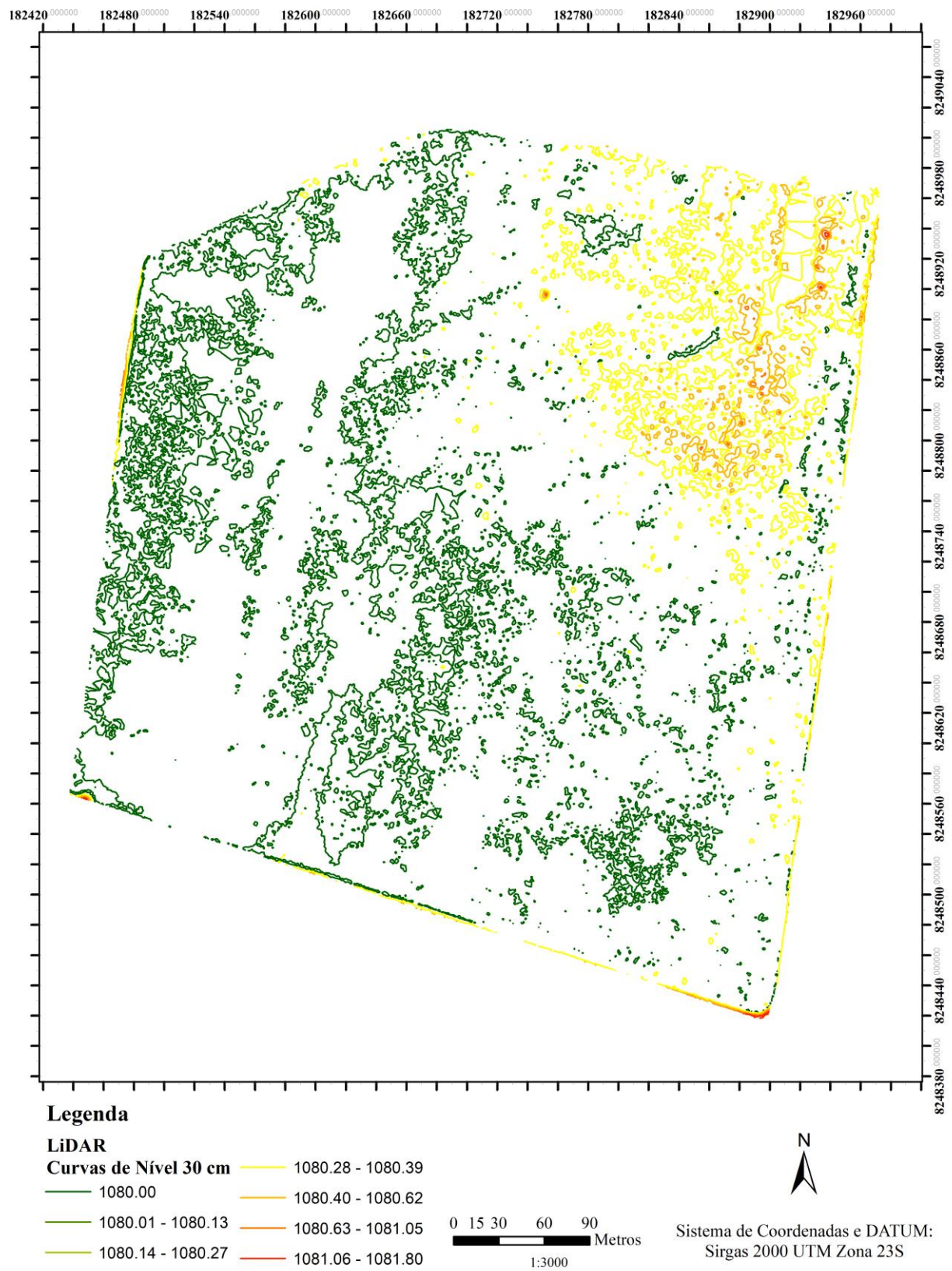


Figura 7.2 - Curvas de Nível 30 cm - LiDAR

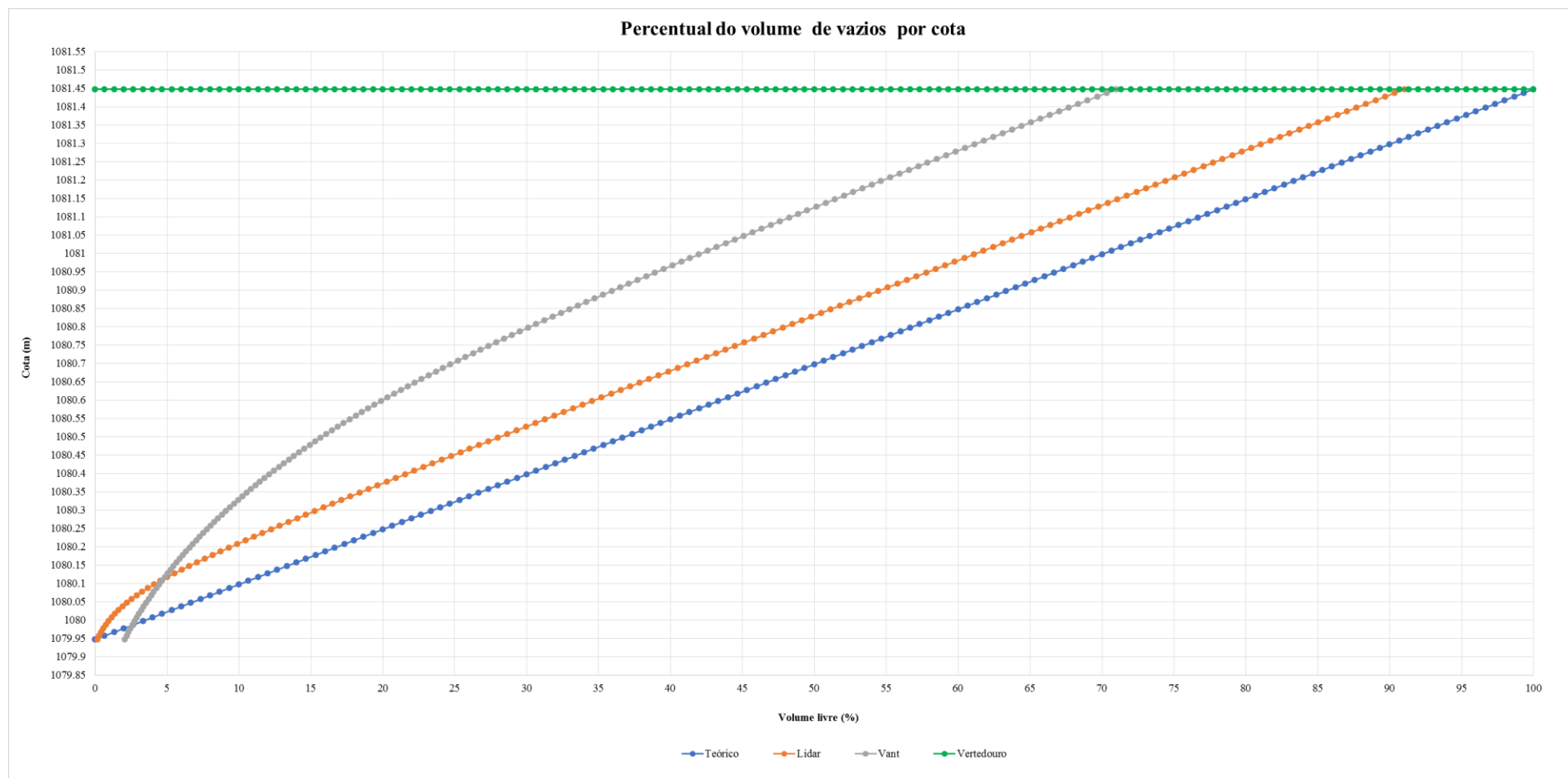


Figura 7.3 - Gráfico do percentual de volume de vazios por cota.

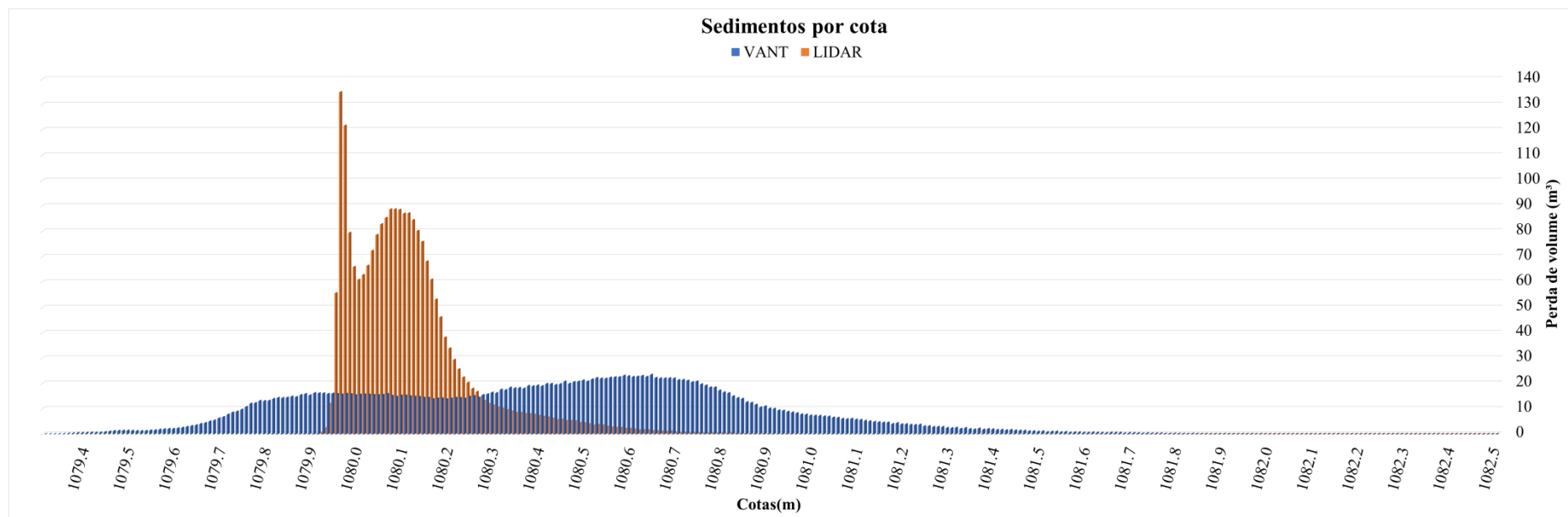


Figura 7.4 - Gráfico de perda de volume (volume de sedimentos, vegetação e ruídos) por cota; Lidar (laranja) e VANT (azul).